

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**

# **Estudo da Eficiência Energética na Iluminação - Desenvolvimento de uma Ferramenta de Cálculo Luminotécnico e de Rentabilidade**

**Rúben Fernandes Guedes de Oliveira e Silva**



Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor José Rui da Rocha Pinto Ferreira

24 de Março de 2013



# Resumo

A iluminação representa um dos maiores custos em energia para grande parte das empresas e edifícios. Para saber onde existem os maiores consumos e desperdícios de energia é necessário proceder a uma análise do consumo energético recorrendo a uma auditoria energética. Após a realização de uma auditoria é necessário utilizar a informação que resulta da sua conclusão para realizar vários estudos e cálculos detalhados recorrendo a *software* especializado para esses cálculos de iluminação. Este estudo exaustivo implica várias horas de trabalho e de preparação resultando assim num relatório final e num plano de racionalização de consumos de energia onde estão presentes as medidas necessárias para a redução dos consumos.

Existe um grande período de tempo entre a realização da auditoria e a conclusão do relatório final em que o cliente não tem conhecimento sobre que medidas serão necessárias realizar, volume de investimento, retorno do investimento, consumo de energia atual, entre outros.

O trabalho que conduziu à escrita esta Dissertação baseou-se na criação de uma ferramenta de cálculo de iluminação e de rentabilidade das alterações propostas, usando dados disponíveis sobre características dos edifícios ou empresas em estudo para conseguir obter uma solução inicial, com resultados muito próximos dos presentes no estudo final. Com esta simulação é possível fornecer algum *feedback* ao cliente, *in loco*, sobre as alterações que irão ser propostas futuramente e que tipo de investimentos e retornos pode esperar.





# Abstract

Lighting represents one of the biggest energy costs for most of the public and business sector buildings. To find where the greatest consumption and waste of energy are it is necessary to analyze the energy consumption through an energy audit. After conducting an audit, the resulting information is used to perform various studies and detailed calculations using specialized software for lighting calculations. This exhaustive study involves several hours of work and preparation resulting in a final report and a energy saving plan in which are present the measures necessary to reduce the current consumption.

There is a long period of time between the energy audit and the final report in which the customer has no knowledge about the necessary measures to implement, the investment volume, the return on investment, current power consumption, among others.

The background of this Dissertation was the creation of a tool for lighting calculation and profitability of the proposed changes, using available data about characteristics of the buildings that are object of study to be able to get an initial solution, with very similar results to those present in the final study. With this simulation it is possible to provide some feedback to the customer, on the spot, about the changes that will be proposed in the future and the the volume of investment and return that can be expected.



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer o apoio e orientação do Professor José Rui da Rocha Pinto Ferreira.

Quero ainda agradecer à equipa da empresa Serviterme composta pelo Engenheiro Paulo Francisco Henriques Ferreira de Carvalho, pelo Engenheiro Fernando José Pinto da Silva e pelo Engenheiro João Silva Pontes Carvalhido. Destaco a sua disponibilidade incondicional e interesse dedicado à realização deste trabalho.

Rúben Fernandes Guedes de Oliveira e Silva



*“Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.”*

Mahatma Gandhi



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Caracterização do Tema . . . . .	1
1.2	Objetivos da Dissertação . . . . .	3
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Luminotecnia</b>	<b>5</b>
2.1	Conceitos Fundamentais . . . . .	5
2.2	Tipos de Lâmpadas . . . . .	9
2.2.1	Lâmpadas de Descarga . . . . .	9
2.2.1.1	Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão . . . . .	10
2.2.1.2	Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão . . . . .	15
2.2.2	Lâmpadas de Indução . . . . .	20
2.2.3	Lâmpadas de Incandescência . . . . .	21
2.2.4	Lâmpada <i>LED (Light Emitting Diode)</i> . . . . .	23
2.2.5	Comparação de Características . . . . .	25
2.3	Dispositivos Auxiliares . . . . .	26
2.3.1	Arrancadores . . . . .	26
2.3.2	Ignitores . . . . .	27
2.3.3	Condensadores de Compensação . . . . .	28
2.3.4	Balastros . . . . .	28
2.3.4.1	Balastros Eletromagnéticos . . . . .	28
2.3.4.2	Balastros Eletrônicos . . . . .	29
2.4	Luminárias . . . . .	30
2.4.1	Luminárias para Iluminação Interior . . . . .	32
2.4.1.1	Luminárias Encastradas . . . . .	32
2.4.1.2	Luminárias de Montagem Suspensa . . . . .	33
2.4.1.3	Luminárias de Montagem Saliente . . . . .	33
2.4.1.4	Luminárias to tipo <i>Downlight</i> . . . . .	35
2.4.1.5	Luminárias com Calha Eletrificada . . . . .	36
2.5	Resumo . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Dimensionamento de um Sistema de Iluminação</b>	<b>37</b>
3.1	Cálculo Luminotécnico . . . . .	37
3.1.1	Método do Fator de Utilização . . . . .	37
3.1.2	Software Específico . . . . .	43
3.2	Eficiência do Sistema de Iluminação . . . . .	44
3.2.1	Potência Total Instalada . . . . .	44
3.2.2	Densidade de Potência . . . . .	45

3.2.3	Densidade de Potência Relativa . . . . .	45
3.3	Cálculo de Rentabilidade . . . . .	46
3.3.1	Custos de Investimento . . . . .	46
3.3.2	Custos Operacionais . . . . .	46
3.3.2.1	Consumo Mensal . . . . .	47
3.3.2.2	Custo do Consumo Mensal de Energia . . . . .	47
3.3.2.3	Custo Médio Mensal de Reposição de Lâmpadas . . . . .	48
3.3.3	Retorno de Investimento . . . . .	48
3.4	Resumo . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Trabalho Desenvolvido</b>	<b>51</b>
4.1	Introdução . . . . .	51
4.2	Visão Geral . . . . .	52
4.2.1	Cálculo Luminotécnico . . . . .	53
4.2.2	Análise de Sistemas . . . . .	55
4.2.3	Comparação de Sistemas . . . . .	57
4.3	Funcionalidades . . . . .	57
4.3.1	Cálculo Luminotécnico . . . . .	58
4.3.2	Análise de Sistemas . . . . .	61
4.3.2.1	Análise de Sistemas Dimensionados . . . . .	61
4.3.2.2	Análise de Sistemas em Operação . . . . .	63
4.3.3	Comparação de Sistemas . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Caso de Estudo - Serviterme</b>	<b>67</b>
5.1	Sistema de Iluminação em Operação . . . . .	67
5.2	Sistemas de Iluminação Propostos . . . . .	70
5.2.1	Projeto A - Externo . . . . .	70
5.2.2	Projeto B - Serviterme . . . . .	71
5.3	Simulação na Ferramenta Desenvolvida . . . . .	73
5.3.1	Sistema de Iluminação em Operação . . . . .	73
5.3.2	Sistemas de Iluminação Propostos . . . . .	74
5.3.2.1	Projeto A - Externo . . . . .	74
5.3.2.2	Projeto B - Serviterme . . . . .	79
5.3.3	Comparação de Sistemas . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>85</b>
6.1	Satisfação dos Objetivos . . . . .	85
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	86
<b>A</b>	<b>Projeto A - Externo</b>	<b>87</b>
A.1	Distribuição das Luminárias . . . . .	87
	<b>Referências</b>	<b>89</b>



# Lista de Figuras

1.1	Sucessão de eventos . . . . .	2
1.2	Fases de uma Auditoria Energética . . . . .	3
2.1	Espectro electromagnético [6] . . . . .	5
2.2	Curva de sensibilidade do olho humano a radiações monocromáticas [6] . . . . .	6
2.3	A superfície absorve os raios de luz incidente exepcto os raios vermelhos [7] . . . . .	6
2.4	Fluxo Luminoso emitido [6] . . . . .	7
2.5	Intensidade luminosa, Iluminância e Luminância [8] . . . . .	8
2.6	Lâmpadas de descarga . . . . .	9
2.7	Esquema de uma lâmpada de vapor de mercúrio [15] . . . . .	10
2.8	Fluxo de energia para uma lâmpada de vapor de mercúrio [11] . . . . .	11
2.9	Configuração da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [11] . . . . .	12
2.10	Fluxo de energia para uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [11] . . . . .	12
2.11	Fluxo de energia para uma lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos [11] . . . . .	13
2.12	Configuração da lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos [11] . . . . .	14
2.13	Configuração da lâmpada de luz mista [11] . . . . .	15
2.14	Esquema de uma lâmpada fluorescente [16] . . . . .	16
2.15	Lâmpada fluorescente T5 e T8 [17] . . . . .	16
2.16	Comparação de uma lâmpada fluorescente T5 atual com uma T8 [18] . . . . .	17
2.17	Fluxo de energia para uma lâmpada fluorescente [11] . . . . .	17
2.18	Diferentes morfologias de uma lâmpada fluorescente [19] . . . . .	18
2.19	Esquema de uma lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão [20] . . . . .	19
2.20	Lâmpada de indução com gerador de alta frequência [21] . . . . .	20
2.21	Fluxo de energia para uma lâmpada incandescente [11] . . . . .	21
2.22	Lâmpadas de halogéneo com diferentes aplicações [11] . . . . .	22
2.23	Esquema interior de um <i>LED</i> (díodo emissor de luz) [22] . . . . .	23
2.24	Diferentes configurações de lâmpadas LED Philips [23] . . . . .	24
2.25	LED tubular Philips [24] . . . . .	24
2.26	LED tubular [24] . . . . .	26
2.27	Arrancador <i>Smart Starter Philips</i> [25] . . . . .	27
2.28	Circuito com um condensador, balastro, ignitor e lâmpada [26] . . . . .	27
2.29	Ignitor eletrónico da <i>Philips</i> [27] . . . . .	27
2.30	Condensadores de compensação Amber [28] . . . . .	28
2.31	Balastro eletromagnético <i>Philips</i> [29] . . . . .	29
2.32	Balastro eletrónico <i>Philips</i> [31] . . . . .	30
2.33	Diagrama polar de uma luminária de iluminação interior [32] . . . . .	31
2.34	Exemplo de tipos de iluminação [34] . . . . .	32
2.35	Luminária encastrada [35] . . . . .	32

2.36	Luminária de montagem suspensa [35]	33
2.37	Luminária de montagem saliente [35]	33
2.38	Luminária de montagem saliente estanque [35]	34
2.39	Luminária de montagem saliente do tipo régua [35]	35
2.40	Luminária do tipo <i>Downlight</i> [35]	35
2.41	Luminária com calha eletrificada [35]	36
3.1	Altura útil ( $h_u$ ) [6]	39
3.2	Distribuição de luminárias tendo em conta as paredes do recinto [33]	43
3.3	Ambiente gráfico de um projeto realizado em <i>DIALux</i> [39]	43
4.1	Os três grandes processos	52
4.2	Processo cálculo luminotécnico	53
4.3	Folha de cálculo onde é realizado o cálculo luminotécnico	54
4.4	Processo análise de sistemas	55
4.5	Análise de sistemas de iluminação dimensionados	56
4.6	Análise de sistemas de iluminação em operação	56
4.7	Processo comparação de sistemas	57
4.8	Folha de cálculo para comparação de sistemas	57
4.9	Nível de iluminância e dados do recinto	58
4.10	Coeficiente de reflexão	58
4.11	Tipo de lâmpada	59
4.12	Formulário para adicionar lâmpada	59
4.13	Luminária, fator de utilização e fator de manutenção	60
4.14	Cálculos finais	60
4.15	Escolha de sistema de iluminação dimensionado	61
4.16	Dados do sistema dimensionado	61
4.17	Cálculos do sistema dimensionado	62
4.18	Comparação de sistemas de iluminação	62
4.19	Dados do sistema em operação	63
4.20	Dados do sistema em operação	63
4.21	Formulário para adicionar sistema de iluminação em operação	64
4.22	Comparação de sistemas de iluminação	65
4.23	Comparação de sistemas de iluminação com recurso a um gráfico de barras	65
5.1	Lâmpada OSRAM FQ 24W/840	68
5.2	Representação em <i>DIALux</i> , perspectiva lateral	69
5.3	Representação em <i>DIALux</i> , perspectiva frontal	69
5.4	<i>Downlight LED 25W</i>	70
5.5	<i>TRILUX Cetrix 600</i>	71
5.6	Representação em <i>DIALux</i> , distribuição das luminárias	72
5.7	Níveis de iluminância para o plano a iluminar na perspectiva vertical	72
5.8	Sistema de iluminação em operação	73
5.9	Balastro em utilização no sistema de iluminação em operação	73
5.10	Cálculos finais para o sistema de iluminação em operação	74
5.11	Cálculo de índice de recinto	75
5.12	Coeficientes de reflexão e tipo de lâmpada	75
5.13	Tipo de luminária e fator de manutenção	76
5.14	Cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação do Projeto A	76

5.15	Análise do sistema de iluminação do Projeto A . . . . .	77
5.16	Cálculos finais para o sistema de iluminação do Projeto A . . . . .	77
5.17	Comparação de sistemas de iluminação . . . . .	78
5.18	Custo do consumo mensal de energia . . . . .	78
5.19	Retorno de investimento para o Projeto A . . . . .	79
5.20	Tipo de lâmpada . . . . .	79
5.21	Tipo de luminária . . . . .	80
5.22	Cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação do Projeto B . . . . .	80
5.23	Análise do sistema de iluminação do Projeto B . . . . .	81
5.24	Cálculos finais para o sistema de iluminação do Projeto B . . . . .	81
5.25	Comparação de sistemas de iluminação . . . . .	82
5.26	Consumo mensal . . . . .	82
5.27	Custo do consumo mensal de energia . . . . .	83
5.28	Retorno de investimento para o Projeto B . . . . .	83
5.29	Retorno de investimento para o Projeto B . . . . .	84
5.30	Densidade de potência relativa . . . . .	84
A.1	Distribuição de luminárias proposta no Projeto A . . . . .	87
A.2	Distribuição de luminárias no recinto em estudo . . . . .	87



# Lista de Tabelas

2.1	Quadro resumo das grandezas . . . . .	7
2.2	Tonalidade de cor de uma lâmpada . . . . .	9
2.3	Valores característicos da lâmpada de vapor de mercúrio . . . . .	11
2.4	Valores característicos da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão . . . . .	13
2.5	Valores característicos da lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos . . . . .	14
2.6	Valores característicos da lâmpada de luz mista . . . . .	15
2.7	Valores característicos da lâmpada fluorescente . . . . .	17
2.8	Valores característicos da lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão . . . . .	19
2.9	Valores característicos da lâmpada de indução . . . . .	20
2.10	Valores característicos da lâmpada de halogéneo . . . . .	23
2.11	Valores característicos de uma lâmpada LED . . . . .	25
2.12	Características dos diversos tipos de lâmpadas . . . . .	25
3.1	Níveis de iluminância adequados a diferentes tarefas ou atividades [37] . . . . .	38
3.2	Tabela de fator de utilização exemplo [33] . . . . .	40
3.3	Coeficientes de reflexão [6] . . . . .	41
3.4	Tabela de fator de manutenção [6] . . . . .	41
3.5	Tabela de um sistema de iluminação . . . . .	47
3.6	Tabela com custos de investimento e operacionais . . . . .	48
4.1	Sistema de iluminação dimensionado . . . . .	53
4.2	Análise de sistemas . . . . .	55
5.1	Escritórios Serviterme . . . . .	68
5.2	Lâmpada utilizado no recinto em estudo . . . . .	68
5.3	<i>Downlight LED</i> . . . . .	70
5.4	Sistema de Iluminação proposto . . . . .	71
5.5	Características da luminária e lâmpada . . . . .	71



# Abreviaturas e Símbolos

ADENE	Agência para a Energia
ARCE	Acordo de Redução dos Consumos de Energia
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
LED	Light Emitting Diode
OLED	Organic Ligth Emitting Diode
PREn	Plano de Racionalização de Consumos de Energia
SI	Sistema Internacional





# Capítulo 1

## Introdução

A energia elétrica consumida nas instalações de iluminação nos diferentes sectores de atividade (indústria, serviços e doméstico) representa cerca de 25% do consumo global do país e cerca de 5% a 7% do consumo global de energia elétrica de uma instalação industrial [1].

No caso particular dos edifícios de serviços, o consumo de energia elétrica para iluminação pode atingir os 50% do consumo total de eletricidade, isto porque a iluminação artificial é maioritariamente utilizada durante o dia. A utilização de lâmpadas com uma eficiência muito reduzida vai provocar um aumento da temperatura ambiente uma vez que grande parte da energia consumida é convertida em calor. Sendo assim, durante os meses mais quentes do ano, este calor emitido pelos sistemas de iluminação vai implicar um uso ainda mais intensivo dos sistemas de climatização, provocando assim um maior aumento dos consumos energéticos. É possível verificar então que o uso de lâmpadas eficientes e um dimensionamento correto dos sistemas de iluminação permite uma redução elevada na fatura energética [2].

### 1.1 Caracterização do Tema

Face aos intensos consumos energéticos que existem atualmente em grande parte das empresas e edifícios, é de grande importância apostar em medidas e formas de controlar esses gastos.

Para perceber onde existe o consumo, quando e como a energia é utilizada, qual a eficiência dos equipamentos e onde existem os maiores desperdícios de energia é necessário proceder à execução de uma Auditoria Energética. Uma Auditoria Energética é um exame detalhado das condições de utilização de energia numa determinada instalação, permitindo identificar o seu desempenho energético numa escala predefinida, recomendando posteriormente um conjunto de melhorias que uma vez implementadas vão reduzir os consumos e custos energéticos dos edifícios. Este conjunto de melhorias propostas está presente no *PREn* (*Plano de Racionalização de Consumo de Energia*).

Após a aprovação da Auditoria Energética e respetivo *PREn*, este último passa a designar-se *ARCE* (*Acordo de Redução dos Consumos de Energia*) tal como apresentado na figura 1.1. Este acordo prevê a implementação de medidas redutoras dos consumos de energia, bem como a



Figura 1.1: Sucessão de eventos

apresentação à *DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia)* de um relatório bianual de progresso do acordo [3].

É importante referir que de acordo com o grau de complexidade da instalação e o fim a que a Auditoria Energética se destina podem ser definidos dois tipos de auditorias [4]:

- **Auditoria simples** — Tem como finalidade fazer um diagnóstico da situação energética de uma instalação, consistindo numa simples observação visual para identificar falhas e numa recolha de dados suscetíveis de fornecer alguma informação sobre os consumos específicos de energia;
- **Auditoria completa** — Consiste num levantamento aprofundado da situação energética, analisando-se as quantidades de energia utilizadas em cada uma das operações do processo de fabrico.

No caso da auditoria completa, existe um estudo aprofundado de todo o processo de fabrico e de todos os processos que contribuem para os consumos energéticos da instalação. Há um grande número de sistemas que é necessário analisar e estudar com revelado pormenor, como é o caso dos sistemas de climatização, iluminação, de produção de energia, entre outros. É por isso necessário referir qual o sistema objeto de estudo para o trabalho realizado nesta Dissertação.

A escolha do sistema é justificada com base nos seguintes critérios:

- **Percurso académico e conhecimentos adquiridos** — Tendo em conta o percurso académico realizado pelo mestrando e os conhecimentos adquiridos ao longo desse percurso;
- **Trabalho desenvolvido na empresa Serviterme** — Contribuição futura para auditorias energéticas realizadas pela empresa Serviterme;
- **Área de interesse pessoal** — O sistema escolhido também representa para o mestrando uma área de elevado interesse pessoal o que implica grande motivação para desenvolver um bom trabalho.

Tendo em conta os pontos anteriores o sistema de iluminação foi escolhido como objeto de estudo para o trabalho desenvolvido nesta Dissertação.

Escolhida a área de estudo é importante definir qual o possível contributo do trabalho desenvolvido.

Uma Auditoria Energética pode ser dividida em quatro fases distintas, como se apresenta na figura 1.2 [5]:



Figura 1.2: Fases de uma Auditoria Energética

Após a realização da intervenção local da Auditoria Energética, existe um extenso período de tempo até à conclusão do relatório final onde é necessário proceder ao tratamento de dados e por fim elaborar o relatório final da Auditoria. Durante esse período, o responsável pela instalação não recebe qualquer informação sobre que tipo de medidas poderão ser propostas, valores de investimento que essas propostas implicam, poupança de energia resultante da sua implementação, atuais consumos de energia, entre outros. É essa falha de comunicação que se pretende minimizar e também ao mesmo tempo fornecer uma ferramenta de apoio aos responsáveis pela Auditoria Energética.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Tal como referido anteriormente, um dos objetivos principais desta Dissertação é elaborar uma solução que permita informar o responsável pela instalação consumidora de energia após a intervenção local da Auditoria Energética. Uma vez adquiridas as características da instalação é possível realizar, no local e com rapidez, todos os cálculos luminotécnicos, características de uso, custos envolvidos, investimento necessário e retorno de investimento com o intuito de informar o cliente. É também importante permitir aos técnicos responsáveis pela Auditoria Energética a possibilidade de simular diferentes cenários para a instalação em estudo, utilizando diferentes configurações possíveis e comparando cenários.

O objetivo deste trabalho não é substituir o *software* utilizado para os cálculos luminotécnicos. Esse *software* é utilizado durante a fase de tratamento de dados e elaboração das propostas finais

que estão presentes no relatório final. Novamente é salientado que a ferramenta desenvolvida vai ser útil durante a fase de intervenção local da Auditoria Energética para obter estimativas e simulações não tendo sido desenvolvida para servir de fundamento para a realização do relatório final da Auditoria.

Pretende-se fornecer informação relevante, comparar diferentes soluções, com uma ferramenta intuitiva e de uso acessível sem a necessidade de investir muitos recursos. Os métodos que existem para realizar estes estudos iniciais e para gerar simulações de diferentes configurações exigem a utilização de diferentes tabelas, necessidade de uso de inúmeras equações, conhecimento de várias características dos equipamentos a usar, entre outros.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentado o tema e os objetivos do trabalho desenvolvido.

A revisão bibliográfica é realizada no capítulo 2 e no capítulo 3. No capítulo 2, **Luminotecnia**, é apresentada uma breve revisão de alguns conceitos básicos de luminotecnia e uma abordagem aos vários tipos de lâmpadas e luminárias que constituem um sistema de iluminação. No capítulo 3, **Dimensionamento de um Sistema de Iluminação**, é abordado o dimensionamento de um sistema de iluminação onde são apresentadas as diversas fases que constituem um projeto luminotécnico. No capítulo 4, **Trabalho Desenvolvido**, é apresentada a ferramenta desenvolvida que conduziu à escrita desta Dissertação e no capítulo 5, **Caso de Estudo - Serviterme**, é apresentado um caso de estudo que permitiu testar a ferramenta.

Por fim no capítulo 6, **Conclusão e Trabalho Futuro**, é apresentada uma análise ao trabalho desenvolvido onde são abordados os objetivos alcançados e possíveis alterações ou melhorias da ferramenta desenvolvida.

## Capítulo 2

# Luminotecnia

Este capítulo é dividido em quatro secções, sendo realizada inicialmente uma breve revisão de alguns conceitos básicos de luminotecnia na secção 2.1. Após essa revisão é realizada uma abordagem aos tipos de lâmpadas e dispositivos auxiliares necessários na secção 2.2 e 2.3. Por fim, na secção 2.4 são apresentados alguns conhecimentos sobre luminárias.

### 2.1 Conceitos Fundamentais

Nesta secção, são abordados alguns conceitos e grandezas fundamentais para um correto entendimento da luminotecnia. Mas é necessário em primeiro lugar discutir dois conceitos básicos: a Luz e a Cor [6], [7].

#### Luz

Podemos definir a Luz como sendo a radiação eletromagnética que é capaz de produzir uma sensação visual. Isto porque uma fonte de radiação emite determinadas ondas eletromagnéticas que possuem diferentes comprimentos, mas apenas alguns desses comprimentos são perceptíveis pelo olho humano.

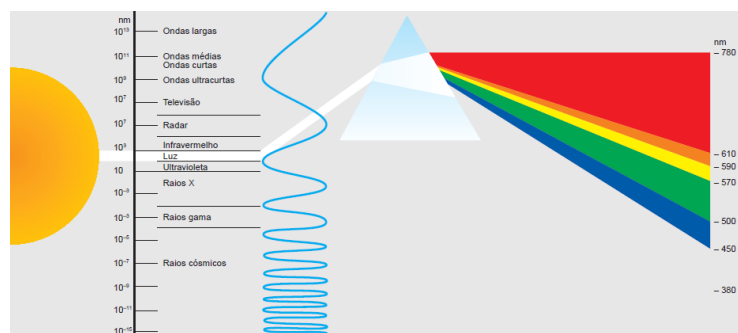


Figura 2.1: Espectro electromagnético [6]

No entanto a sensibilidade visual para a luz não depende só do comprimento de onda da radiação, mas também da luminosidade.

A curva de sensibilidade do olho humano a radiações monocromáticas demonstra que as radiações de menor comprimento de onda, como por exemplo o violeta e azul, geram maior intensidade de sensação luminosa quando existe pouca luz, enquanto que as radiações de maior comprimento de onda, como por exemplo o laranja e vermelho, geram maior intensidade de sensação quando existe mais luz [6].

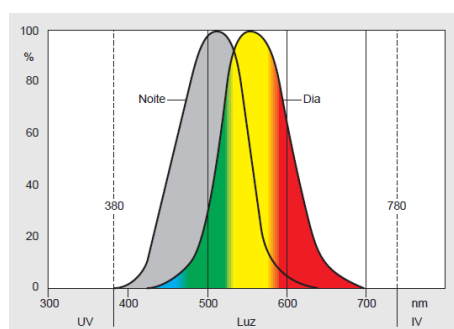


Figura 2.2: Curva de sensibilidade do olho humano a radiações monocromáticas [6]

## Luz e Cor

Existe a ideia que os objetos possuem cores definidas, mas na realidade a cor que um objeto apresenta é resultado da iluminação incidente sobre ele mesmo. Um objeto apresenta determinada cor se não absorver justamente os raios correspondentes à frequência dessa cor. Por exemplo, uma maçã sob uma luz branca pode apresentar cor vermelha pois esta tende a refletir a porção de vermelho do espectro da radiação absorvendo a luz nos outros comprimentos de onda. Se utilizássemos um filtro para remover a porção do vermelho da fonte de luz, a maçã iria refletir muito pouca luz apresentando uma cor muito próxima do preto.

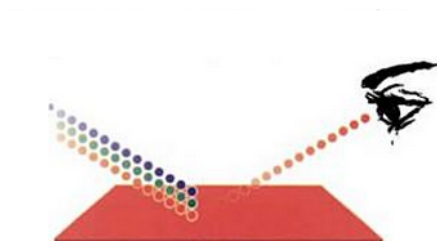


Figura 2.3: A superfície absorve os raios de luz incidente exepcto os raios vermelhos [7]

Após esta pequena abordagem ao conceito de luz e cor é importante definir outros conceitos mais específicos [6], [8], [9], [10].:

- **Fluxo Luminoso** — o fluxo luminoso expressa a maior ou menor capacidade possuída por um fluxo energético para produzir sensação luminosa. O fluxo luminoso é a quantidade de luz emitida por uma fonte, medida em lúmen, na tensão nominal de funcionamento. A radiação total da fonte luminosa situa-se entre os limites de comprimento de onda de 380 a 780 nanómetros. A unidade em SI para o fluxo luminoso é o lúmen.



Figura 2.4: Fluxo Luminoso emitido [6]

- **Intensidade Luminosa** — é o fluxo luminoso compreendido na unidade de ângulo sólido no qual é emitido, pressupondo-se que a fonte luminosa é pontual. A intensidade luminosa é medida na unidade SI de candela.
- **Iluminância** — é o fluxo luminoso recebido por unidade de área iluminada sendo expressa na unidade SI lux. Por outras palavras, é a quantidade de luz dentro de um ambiente, sendo habitualmente utilizado um luxímetro para efetuar a sua medição. É importante referir a consideração da iluminância média uma vez que o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente o que implica variações nos valores de iluminância para diferentes pontos da área em questão.
- **Luminância** — refere-se à intensidade irradiada por uma unidade de superfície aparente, sendo a sua unidade SI a candela por metro quadrado. Facilmente se entende o que representa a luminância se pensarmos nesta como sendo a sensação de claridade proveniente da incidência de uma fonte luminosa numa determinada superfície.

Tabela 2.1: Quadro resumo das grandezas

Grandeza	Símbolo	Unidade
Fluxo Luminoso	$\phi$	Lúmen (lm)
Intensidade Luminosa	I	Candela (cd)
Iluminância	E	Lux (lux)
Luminância	L	Candela por metro quadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

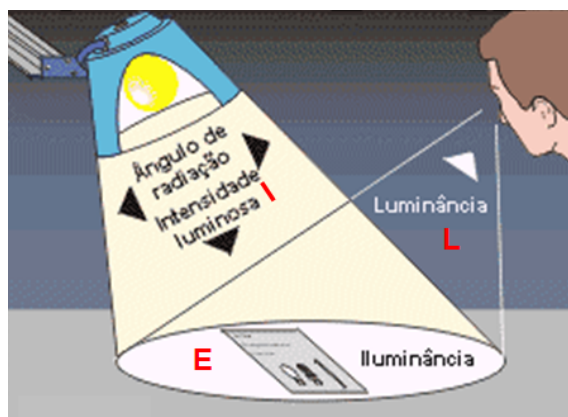


Figura 2.5: Intensidade luminosa, Iluminância e Luminância [8]

- **Reflexão e Reflectância** —A reflexão consiste na alteração da direção da propagação da luz quando embate numa determinada superfície. A reflectância representa a proporção entre o fluxo de radiação que incide na superfície e o fluxo que é refletido, sendo usualmente representada em percentagem. Uma superfície com uma reflectância de 100% implica uma reflexão total da luz emitida, ou seja, toda a luz que foi emitida na direção de uma determinada superfície foi refletida. Sendo assim, diferentes cores e materiais vão implicar reflexões muito diferentes;
- **Rendimento luminoso** —Indicador do rendimento da conversão de energia em luz por uma determinada fonte luminosa. Este indicador relaciona o fluxo luminoso emitido em função da potência dessa fonte luminosa. Um valor elevado de eficiência luminosa significa que a fonte luminosa consome uma quantidade energia reduzida para gerar o fluxo luminoso necessário. A classe de eficiência energética atribuí ao aparelho em questão uma letra que representa a eficiência energética desse aparelho. A unidade SI é o lúmen por Watt (lm/W);
- **Vida Útil** —Corresponde ao período, em horas, durante o qual uma lâmpada funciona corretamente mantendo a sua eficiência luminosa. Após esse período é aconselhável substituir a mesma;
- **IRC - Índice de Restituição Cromática** —Representa a capacidade de uma fonte luminosa restituir fielmente as cores de um objeto. O índice de restituição cromática é uma medida da capacidade da luz artificial se aproximar da luz natural e é um parâmetro adimensional sendo expresso entre 0 e 100;
- **Temperatura de Cor** —Indica a cor aparente da luz emitida sendo que para valores mais altos de temperatura a tonalidade de cor da luz é mais clara. Quando se menciona luzes quentes ou frias pretende-se caracterizar a tonalidade que a lâmpada confere ao ambiente. Para ambientes de descanso utiliza-se usualmente luzes de cor quente e para ambientes de trabalho luzes de cor fria. A sua unidade SI é o Kelvin (K).



Tabela 2.2: Tonalidade de cor de uma lâmpada

Temperatura de Cor	Classificação	Tonalidade de Cor
Inferior a 3300 K	Quente	Branco quente
Entre 3300 K e 5300 K	Intermédia	Branco neutro
Superior a 5300 K	Fria	Branco Frio

## 2.2 Tipos de Lâmpadas

A principal função da lâmpada é a capacidade de converter energia elétrica em luz visível. No entanto, existem diferentes tipos de lâmpadas e com diferentes características. As lâmpadas podem ser agrupadas em quatro famílias distintas:

- **Lâmpadas de Descarga**
- **Lâmpadas de Indução**
- **Lâmpadas de Incandescência**
- **Lâmpadas LED (Light Emitting Diode)**

De seguida é realizada uma abordagem mais pormenorizada a estes quatro tipos de lâmpadas [11], [9], [10], [12], [13], [14].

### 2.2.1 Lâmpadas de Descarga

As lâmpadas de descarga têm como princípio de funcionamento a condução de corrente elétrica por um meio gasoso. Tendo em conta o meio utilizado, estas lâmpadas podem ser divididas em dois grupos:

1. Lâmpadas de descarga com gás ou vapor metálico a alta pressão
2. Lâmpadas de descarga com gás ou vapor metálico a baixa pressão

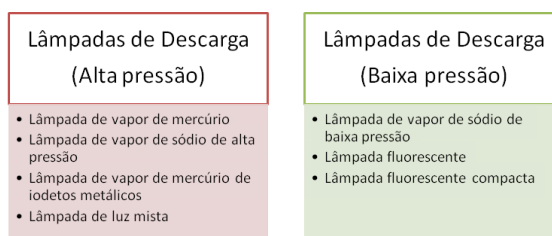


Figura 2.6: Lâmpadas de descarga

Na figura 2.6 é possível observar os tipos de lâmpadas que correspondem aos dois grupos mencionados.

### 2.2.1.1 Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão

Nas lâmpadas de descarga utiliza-se um meio gasoso para que seja possível existir condução de corrente elétrica. Neste caso, para as lâmpadas de descarga de alta pressão, o gás utilizado está a uma pressão superior à pressão atmosférica. Sendo assim, quando o gás se encontra a uma pressão equivalente a três ou quatro atmosferas podemos afirmar que a lâmpada de descarga trabalha em alta pressão.

As lâmpadas de descarga de alta pressão são caracterizadas por uma eficiência luminosa elevada e também por uma longa vida útil. Este tipo de lâmpadas emite uma luz extremamente brilhante sendo por isso muito utilizada em espaços comerciais, estádios, iluminação exterior, entre outros. As lâmpadas de descarga mais modernas, além de uma vida útil elevada, apresentam também um bom rendimento de cor e, como são lâmpadas com um tamanho bastante reduzido, é possível um maior controlo da iluminação, com uma fácil disposição e orientação.

### Lâmpada de Vapor de Mercúrio

O vapor de mercúrio foi utilizado durante muitos anos como única fonte de descarga para as lâmpadas de descarga. O mercúrio à temperatura ambiente é líquido, e por isso é adicionada uma pequena quantidade de argon, um gás de vaporização mais fácil, para facilitar o arranque. É utilizado também um gás inerte para estabilizar a lâmpada, mantendo a temperatura constante para diferentes condições ambientais. Existe um eletrodo em cada extremidade do tubo e ao lado desses eletrodos encontra-se um eletrodo auxiliar de arranque como se pode verificar na figura 2.7.

Este tipo de lâmpadas podem apresentar um rendimento luminoso que pode variar entre 36 lm/W (lúmen por Watt) a 60 lm/W (lúmen por Watt). O tipo de luz emitida é de cor branca-azulada. Como grande parte da radiação emitida se encontra na zona do ultravioleta, é usada uma camada fina de pó fluorescente na superfície interna do invólucro exterior sendo assim possível converter parte da radiação ultravioleta em radiações visíveis.

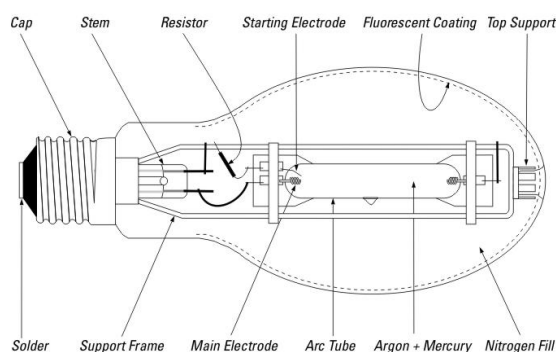


Figura 2.7: Esquema de uma lâmpada de vapor de mercúrio [15]

Na figura 2.8 é possível observar as perdas que ocorrem no fluxo de energia de uma lâmpada de vapor de mercúrio e também é possível verificar que metade da potência da lâmpada é transformada em radiação. Dessa radiação apenas 15% é radiação visível.

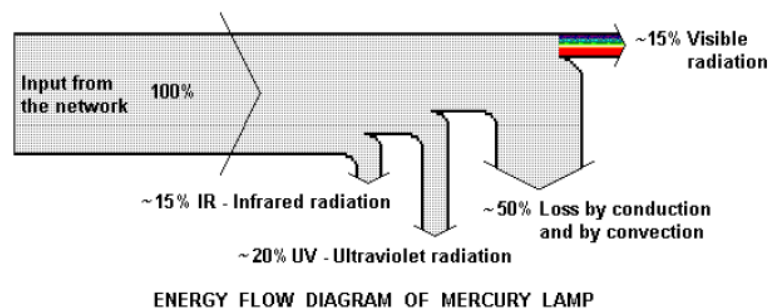


Figura 2.8: Fluxo de energia para uma lâmpada de vapor de mercúrio [11]

Na tabela 2.3 são apresentados alguns dados mais pormenorizados acerca das características deste tipo de lâmpada.

Tabela 2.3: Valores característicos da lâmpada de vapor de mercúrio

Rendimento luminoso	36 a 60 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	40 a 57
Temperatura de cor	3800 K a 4100 K
Tempo de vida útil	10000 a 12000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	4 minutos e 6 minutos
Aparelhos auxiliares	Balastro e Condensador

### Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão

O vapor de sódio possibilita uma proporção de radiação mais elevada comparativamente com o vapor de mercúrio. Nas lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, o tubo de descarga contém sódio em excesso para conferir condições favoráveis à saturação do vapor, quando a lâmpada está em funcionamento. É também utilizado mercúrio em excesso como gás de proteção e xénon, a baixa pressão, para facilitar o arranque e limitar arcos de descarga. A intensa atividade química do vapor de sódio, que opera a uma temperatura de aproximadamente 700 graus, implica o uso de um tubo de descarga capaz de resistir a estas condições severas, este é composto de óxido de alumínio sinterizado e é colocado num invólucro de vidro duro, em vácuo.

Este tipo de lâmpada utiliza um transformador, como auxílio de arranque, uma vez que necessita do uso de uma tensão elevada, superior à da rede.

Na figura 2.9 é possível observar a configuração de dois tipos da lâmpadas de vapor de sódio.

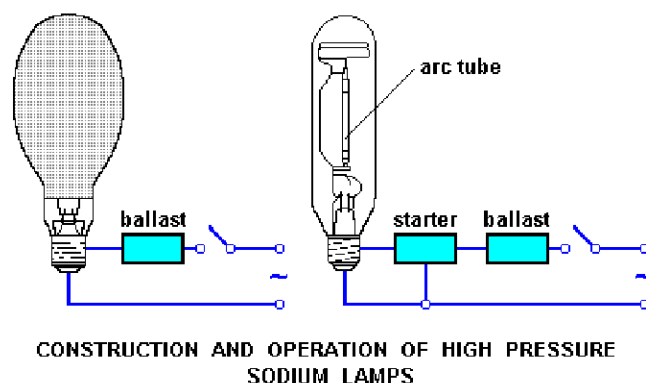


Figura 2.9: Configuração da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [11]

A lâmpada de vapor de sódio a alta pressão emite uma luz dourada, causando assim uma impressão mais agradável do que as lâmpadas de mercúrio de alta pressão. Apresenta um preço mais elevado que esta última, no entanto, o seu rendimento luminoso é bastante mais elevado. Tem uma elevada eficiência luminosa e longa durabilidade, mas como apresenta um fraco índice de restituição de cor existem algumas limitações para o seu uso. É importante referir que o seu arranque lento pode, em alguns casos, demorar até 15 minutos a atingir o funcionamento normal. É importante referir que existem atualmente alguns modelos de lâmpadas deste tipo com emissão de luz branca, permitindo um índice de restituição cromática bastante mais elevado.

Na figura 2.10, verifica-se que este tipo de lâmpada transforma 30% da sua potência em radiação visível, ou seja, grande parte da sua energia é emitida sobre o espectro visível.

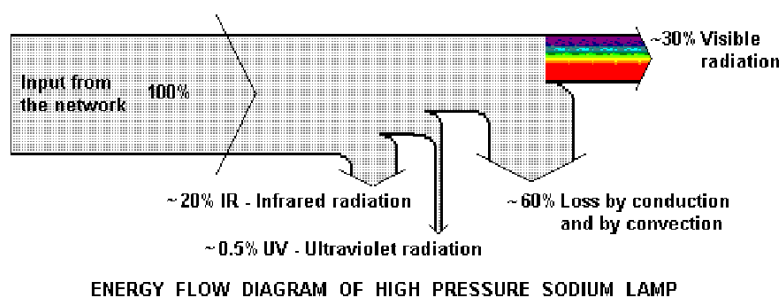


Figura 2.10: Fluxo de energia para uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [11]

Por fim, podemos verificar na tabela 2.4 algumas características importantes relativamente à lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.

Tabela 2.4: Valores característicos da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

Rendimento luminoso	66 a 130 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	25 a 80 (luz branca)
Temperatura de cor	1900 K a 2500 K
Tempo de vida útil	12000 a 18000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	5 minutos e 1 minuto
Aparelhos auxiliares	Balastro, Ignitor e Condensador

### Lâmpada de Vapor de Mercúrio de Iodetos Metálicos

Este tipo de lâmpada foi desenvolvida com o objetivo de proporcionar uma boa restituição de cores, garantindo também um rendimento luminoso elevado e uma vida útil longa. É uma alternativa às lâmpadas de vapor de mercúrio de vapor de sódio que apresentam índices de restituição de cores mais fracos. A lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos é bastante similar à lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão, mas difere na mistura de substâncias contida no tubo de descarga.

Podem ser divididas em dois grupos, de emissores atômicos ou de emissores moleculares. É adicionada uma mistura com estes emissores ao mercúrio, no tubo de descarga, obtendo-se assim uma emissão de luz com um espectro de riscas ou contínuo. A adição de uma mistura com emissores atômicos (iodetos de sódio, índio e tálio) origina uma emissão de luz com um espectro em riscas e a adição de uma mistura com emissores moleculares (cloreto e iodeto de estanho) origina uma emissão de luz com um espectro contínuo. Estas técnicas um pouco complexas justificam o elevado preço do produto final.

O resultado é uma lâmpada com um excelente índice de reprodução de cores, elevada eficiência energética, com uma luz branca e brilhante, longa durabilidade e uma carga térmica bastante reduzida.

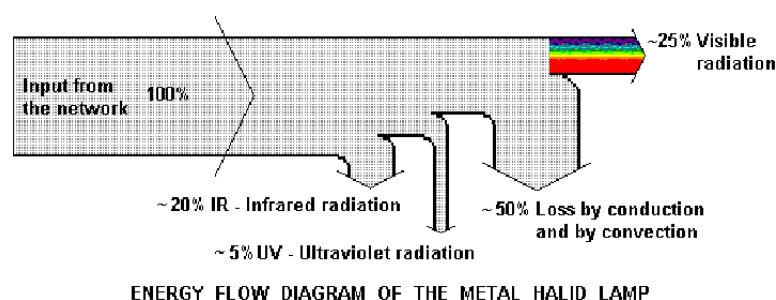


Figura 2.11: Fluxo de energia para uma lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos [11]

Na figura 2.11 é possível observar que a emissão de radiação visível é bastante mais elevada comparativamente ao valor apresentado para a lâmpada de vapor de mercúrio presente na figura 2.8.

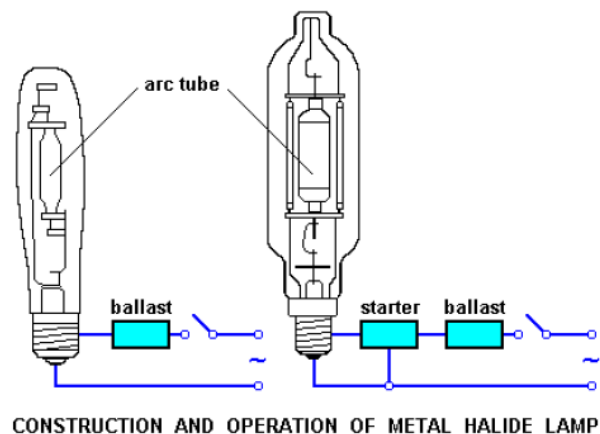


Figura 2.12: Configuração da lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos [11]

Na figura 2.12 é possível observar a configuração de dois tipos da lâmpadas de vapor de mercúrio de iodetos metálicos.

Algumas características deste tipo de lâmpada são apresentados na tabela 2.5.

Tabela 2.5: Valores característicos da lâmpada de vapor de mercúrio de iodetos metálicos

Rendimento luminoso	60 a 96 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	85 a 95
Temperatura de cor	3000 K a 7000 K
Tempo de vida útil	3000 a 9000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	4 minutos e 10 minutos
Aparelhos auxiliares	Balastro, Ignitor e Condensador

### Lâmpada de Luz Mista

As lâmpadas de luz mista são compostas por um filamento de tungstênio ligado em série com um tubo de descarga, ou seja, utilizam tecnologias presentes em dois tipos diferentes de lâmpadas, de vapor de mercúrio de alta pressão e incandescentes.

Este tipo de lâmpada apresenta uma eficiência energética superior à da lâmpada incandescente e é geralmente utilizada como alternativa a esta última, quando se pretende uma solução com maior rendimento. Como as lâmpadas de luz mista não necessitam de qualquer equipamento auxiliar facilmente se procede à substituição.

São lâmpadas com um bom índice de restituição de cores e uma vida útil longa. Podem utilizar uma ampola de vidro de várias formas e cores, sendo escolhidas usualmente para iluminar artigos em exposição em estabelecimentos comerciais. No entanto, o seu rendimento luminoso não é muito elevado e possuem algumas restrições quanto à sua posição de funcionamento não sendo por isso adequadas para sistemas de iluminação.

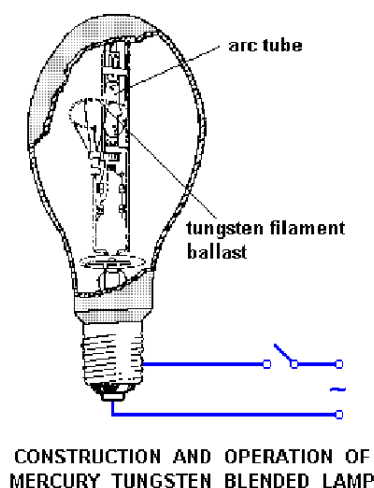


Figura 2.13: Configuração da lâmpada de luz mista [11]

Na figura 2.13 é possível observar a constituição de uma lâmpada de luz mista onde estão representados o tubo de descarga e o filamento de tungstênio. A ligação à rede é realizada diretamente, sem necessidade de utilizar aparelhos auxiliares.

Por fim, na tabela 2.6 são apresentados alguns dados acerca das características deste tipo de lâmpada.

Tabela 2.6: Valores característicos da lâmpada de luz mista

Rendimento luminoso	20 a 30 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	60
Temperatura de cor	3000 K a 4000 K
Tempo de vida útil	3000 a 10000 horas
Aparelhos auxiliares	ligação direta à rede

### 2.2.1.2 Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão

Tal como mencionado anteriormente nas lâmpadas de descarga utiliza-se um meio gasoso para que seja possível existir condução de corrente elétrica. Neste caso, para as lâmpadas de descarga de baixa pressão, o gás utilizado está a uma pressão semelhante à pressão ambiente.

### Lâmpada Fluorescente

Mais de 70% da iluminação artificial mundial é da responsabilidade das lâmpadas fluorescentes. O seu elevado rendimento, longa duração de vida e variadas soluções existentes no mercado, com diferentes temperaturas de cor e índice de restituição cromática, permite criar diversos sistemas de iluminação altamente eficientes e diversificados.

É constituída por um tubo de descarga longo, com elétrodos nas suas extremidades. No tubo de descarga é colocado um gás composto por mercúrio e um gás inerte. Este serve para facilitar o arranque e controlar a descarga; por sua vez, o vapor de mercúrio vai produzir a radiação ultravioleta quando é excitado. O interior do tubo de descarga é revestido com uma substância fluorescente que transforma a radiação ultravioleta em luz visível. Dependendo do material fluorescente utilizado, podem ser conseguidas diferentes variações de cor: branco quente, branco neutro ou branco mais frio. Na figura 2.14 é possível observar alguns dos componentes que constituem a lâmpada.

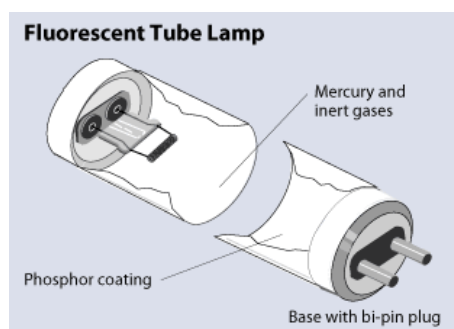


Figura 2.14: Esquema de uma lâmpada fluorescente [16]

Inicialmente, o tubo de descarga das lâmpadas fluorescentes media 38 mm de diâmetro e estas utilizavam um pó fluorescente comum. Mais tarde foram desenvolvidas lâmpadas com tubo de descarga de 26 mm de diâmetro, mas utilizando um novo pó tri-fosforo. Atualmente existem lâmpadas fluorescentes que apresentam um tubo de descarga com 16 mm e 7 mm de diâmetro, utilizando também um pó tri-fosforo, garantindo um elevado rendimento e uma melhor restituição de cores, funcionando apenas com balastros eletrônicos. De acordo com o diâmetro do tubo de descarga da lâmpada existe uma denominação respetiva:

- Tubo de descarga com 38 mm - Lâmpada fluorescente T12
- Tubo de descarga com 26 mm - Lâmpada fluorescente T8
- Tubo de descarga com 16 mm - Lâmpada fluorescente T5
- Tubo de descarga com 7 mm - Lâmpada fluorescente T2



Figura 2.15: Lâmpada fluorescente T5 e T8 [17]



Uma redução do diâmetro do tubo representa uma grande redução do tamanho das armaduras, melhor controlo do feixe luminoso e aumento do rendimento luminoso.

Na figura 2.16 é possível verificar que a lâmpada T5 apresenta um fluxo luminoso muito idêntico à lâmpada T8, mas a sua vida útil é aproximadamente três vezes maior, o seu consumo é menor e o seu rendimento luminoso consegue ser bastante superior.

Cost/benefit analysis: LUMILUX® T5 versus BASIC T8 lamps			
Energy savings:	Old	New	Savings
Type of lamp	BASIC T8	LUMILUX T5	
Sample type	L 58/20	FQ 49/840 HO	
Service life	5000h	18000h	
Luminous flux	4600 lm	4300 lm	
System efficiency	68 lm/W	80 lm/W	
Power consumption in kwh	1600 kwh	1040 kwh	
Power consumption in %	100%	65%	
<b>Energy savings</b>			<b>35%</b>
Power consumption incl. air-conditioning	1852 kwh	1040 kwh	
<b>Savings incl. reduced air-conditioning costs</b>			<b>44%</b>

Figura 2.16: Comparação de uma lâmpada fluorescente T5 atual com uma T8 [18]

O espectro de emissão das lâmpadas fluorescentes não é contínuo e é mais largo do que o emitido pelas lâmpadas incandescentes, a luz é predominantemente difusa sendo adequada para iluminar grandes áreas. Na figura 2.17 é apresentado o fluxo de energia para uma lâmpada fluorescente.

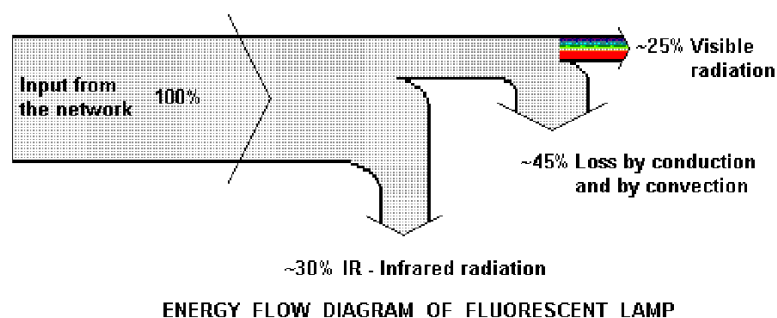


Figura 2.17: Fluxo de energia para uma lâmpada fluorescente [11]

Por fim é apresentado na tabela 2.8 as características médias de uma lâmpada fluorescente.

Tabela 2.7: Valores característicos da lâmpada fluorescente

Rendimento luminoso	até 100 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	85 a 95
Temperatura de cor	2700 K a 5000 K
Tempo de vida útil	7500 a 12000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	Instantâneo
Aparelhos auxiliares	Balastro, Arrancador e Condensador

## Lâmpada Fluorescente Compacta

A lâmpada fluorescente compacta foi desenvolvida para competir com os tipos de lâmpadas de menor dimensão existentes no mercado. As lâmpadas fluorescentes tubulares anteriormente discutidas implicam a utilização de armaduras específicas para o seu tamanho. Assim, foi necessário desenvolver uma versão de menor dimensão para competir com as lâmpadas incandescentes e de vapor de mercúrio que apresentam diversos formatos.

Este tipo de lâmpada é considerada de baixo consumo, com uma duração de vida longa, baixa emissão térmica e um rendimento luminoso bastante elevado, tendo em conta a sua dimensão. O seu funcionamento é idêntico às fluorescentes tubulares, mas a sua morfologia é diferente, apresentando o tubo de descarga curvado ou combinações de vários tubos de descarga de menor dimensão, para que lâmpada seja mais compacta.

As lâmpadas fluorescentes compactas são produzidas em duas topologias, as fluorescentes compactas integradas e as não integradas. As integradas possuem um arrancador incorporado e apresentam um casquilho do tipo Edison para ligação direta à rede, ou seja, permitem substituir as lâmpadas incandescentes. As não integradas apresentam um casquilho com pinos e necessitam de acessórios externos, podendo ser utilizadas com balastos eletrónicos permitindo uma alimentação elétrica regulável.

Na figura 2.18 é possível observar três diferentes ligações, a primeira é uma lâmpada fluorescente compacta integrada e as duas últimas são lâmpadas fluorescentes compactas não integradas.

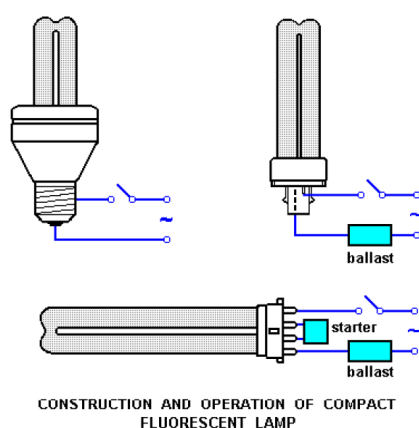


Figura 2.18: Diferentes morfologias de uma lâmpada fluorescente [19]

Os valores característicos desta lâmpada são muito idênticos aos valores apresentados para a lâmpada fluorescente tubular. No entanto o seu rendimento luminoso é um pouco mais baixo visto tratar-se de uma lâmpada mais compacta, ou seja, o seu tubo de descarga é de menor dimensão. Apresenta um rendimento luminoso entre os 40 e os 70 lm/W.

### Lâmpada de Vapor de Sódio de Baixa Pressão

A lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão é muito similar à lâmpada fluorescente na sua construção e forma de funcionar, mas em vez de vapor de mercúrio é utilizado vapor de sódio. No entanto, o vapor de sódio não produz vapor metálico à temperatura ambiente. É necessário provocar uma descarga num gás inerte para que se crie calor suficiente para vaporizar o vapor de sódio. Este tipo de lâmpadas requerem uma tensão de arranque elevada, superior à rede, sendo por isso necessário recorrer a um transformador.

Na figura 2.20 podemos ver a constituição da lâmpada com a ampola exterior e o tubo de descarga interior, onde está o sódio depositado. O refletor de calor e a camada que reveste o interior da ampola servem para manter a temperatura de funcionamento suficientemente elevada.

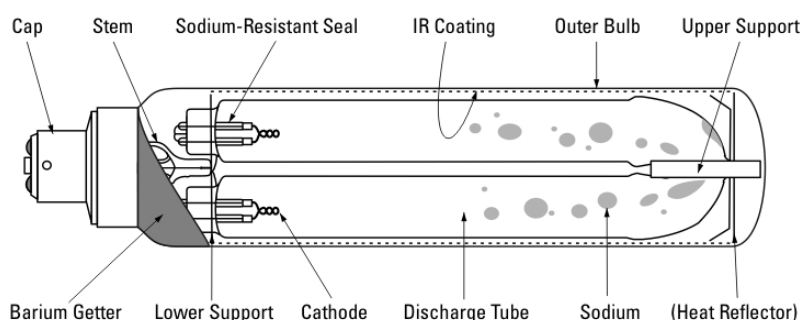


Figura 2.19: Esquema de uma lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão [20]

A lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão é caracterizada por um rendimento luminoso extraordinário, atingindo os 200 lm/W. Apesar de ser o tipo de lâmpada que apresenta o rendimento luminoso mais elevado, também é a lâmpada que apresenta a pior qualidade na luz que emite, sendo esta amarela monocromática. Apenas consegue produzir luz em duas linhas espectrais muito próximas o que resulta numa restituição de cores extremamente pobre sendo muito difícil a distinção das cores dos objetos que ilumina. Esta característica limita as áreas de utilização da lâmpada, sendo esta maioritariamente utilizada em iluminação pública, iluminação de vigilância e de túneis. Apresenta um tempo de arranque bastante elevado e existem algumas restrições em relação à sua posição de funcionamento.

Tabela 2.8: Valores característicos da lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão

Rendimento luminoso	até 200 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	3
Temperatura de cor	2200 K
Tempo de vida útil	16000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	10 minutos e instantâneo
Aparelhos auxiliares	Balastro, Ignitor e Condensador

### 2.2.2 Lâmpadas de Indução

Os elétrodos são uma das partes mais vulneráveis das lâmpadas de descarga. As lâmpadas perdem a sua potência devido ao impacto de iões ou por reações químicas com os vapores dentro do tubo de descarga. No entanto, as lâmpadas de indução magnética não necessitam de elétrodos. O seu princípio de funcionamento é baseado na utilização de um núcleo cilíndrico de ferrite que serve para criar um campo magnético, induzindo uma corrente elétrica no gás a baixa pressão que se encontra num recipiente de descarga, provocando assim a sua ionização e consequente emissão de radiação luminosa visível.

Para que exista energia suficiente para se iniciar e manter a descarga da lâmpada é utilizado um gerador de alta frequência. Como funcionam a alta frequência, obtém-se uma luz bastante confortável e sem oscilações visíveis. A tecnologia utilizada nas lâmpadas de indução magnética possibilita um conjunto de benefícios: elevada duração de vida média; tempo de arranque rápido; custos de manutenção muito reduzidos; rendimento luminoso elevado; várias tonalidades de cor.



Figura 2.20: Lâmpada de indução com gerador de alta frequência [21]

É importante referir que o tempo de vida útil muito elevado destas lâmpadas, podendo chegar até 100000 horas, e resistência a condições extremas possibilitam a sua utilização em zonas onde a manutenção e substituição de equipamentos é extremamente difícil. É de salientar que um tempo de vida útil com este valor pode significar 20 anos em funcionamento a uma utilização diária de 12 horas. Na tabela 2.9 é possível observar algumas características importantes da lâmpada de indução magnética.

Tabela 2.9: Valores característicos da lâmpada de indução

Rendimento luminoso	até 92 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	83
Temperatura de cor	2700 K a 4000 K
Tempo de vida útil	100000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	rápido sem cintilação
Aparelhos auxiliares	Gerador de alta frequência

### 2.2.3 Lâmpadas de Incandescência

#### Lâmpada de Incandescência Convencional

A lâmpada incandescente é constituída por um filamento de tungstênio colocado no interior de uma ampola de vidro que é preenchida com um gás inerte, normalmente azoto ou argon. Quanto mais elevada for a temperatura do filamento, maior será a proporção de energia que é radiada na região visível do espectro e consequentemente maior é o rendimento luminoso da lâmpada. A utilização do tungstênio permite maiores temperaturas de funcionamento uma vez que o seu ponto de fusão é bastante elevado e o de vaporização é baixo. Para se conseguir ainda melhor rendimento é usual utilizar-se um filamento em espiral, por vezes em dupla espiral.

No entanto, este tipo de lâmpadas possui um rendimento luminoso muito baixo e uma vida útil também muito reduzida não representando nenhuma mais valia face as soluções existentes no mercado. Apenas 10% da energia elétrica consumida pela lâmpada é transformada em luz, 90% é transformada em calor. A existência de alternativas muito mais eficientes e o nível muito baixo de eficiência energética apresentado pelas lâmpadas incandescentes impeliu a União Europeia a proibir a sua utilização. A tendência futura será para implementar medidas que possibilitem gradualmente retirar do mercado todos os tipos de lâmpadas com reduzida eficiência energética.

Na figura 2.21 é possível observar a pequena parcela de radiação visível emitida, aproximadamente 10%.

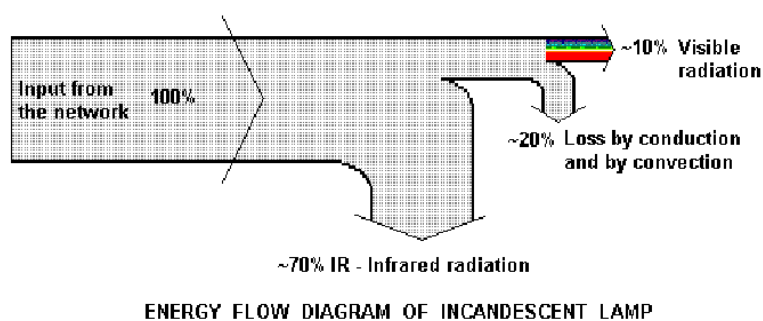


Figura 2.21: Fluxo de energia para uma lâmpada incandescente [11]

É importante referir que as lâmpadas incandescentes apresentam uma boa restituição de cores, mas a sua duração média de vida não ultrapassa as 1000 horas e o seu rendimento luminoso é aproximadamente 10 lm/W. Facilmente se verifica que estes valores são extremamente reduzidos relativamente a alguns tipos de lâmpadas já mencionados.

## Lâmpada de Halogéneo

Nas lâmpadas incandescentes convencionais, existe um filamento que emite luz com a passagem de corrente elétrica e uma parcela desse filamento evapora-se durante o processo. O filamento é constituído por átomos de tungsténio, os quais se vão depositar na superfície interna da ampola o que requer que a ampola tenha uma dimensão suficientemente elevada para evitar o rápido escurecimento.

O funcionamento de uma lâmpada de halogéneo é muito similar, mas no seu interior existem gases inertes e halogéneo, que servem para capturar os átomos de tungsténio e transportar os mesmos de volta para o filamento. Com esta modificação, é possível obter uma lâmpada com uma dimensão mais reduzida, elevando também o seu fluxo luminoso e a sua vida útil. O invólucro deste tipo de lâmpadas é constituído por quartzo especial, capaz de resistir a altas temperaturas e de absorver qualquer componente que se armazene no mesmo.

Lâmpadas de halogéneo mais recentes, denominadas lâmpadas de halogéneo refletoras, apresentam a ampola em vidro prensado constituída por uma parte refletora parabólica revestida com pó de alumínio e um vidro refrator frontal. Existem também lâmpadas com óptica incorporada, com ampola de quartzo claro transparente ou opalino para se obter um efeito luminoso mais difuso, a sua camada refletora é constituída por alumínio com uma superfície interna em multi-face, permitindo assim várias aberturas do feixe luminoso.

Na figura 2.22 é possível observar diversos formatos da lâmpada de halogéneo, desde alguns formatos de menor dimensão, refletoras e algumas mais convencionais.

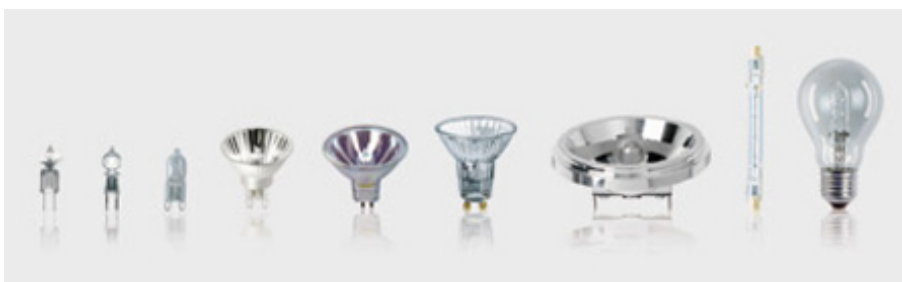


Figura 2.22: Lâmpadas de halogéneo com diferentes aplicações [11]

As lâmpadas de halogéneo apresentam então uma eficiência energética e uma duração de vida superior às incandescentes convencionais, menor dimensão, muito boa restituição de cores e permitem, em alguns casos, uma substituição direta.

Na tabela 2.10 são apresentadas características importantes deste tipo de lâmpada.

Tabela 2.10: Valores característicos da lâmpada de halogéneo

Rendimento luminoso	até 25 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	100
Temperatura de cor	3000 K
Tempo de vida útil	4000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	instantâneo
Aparelhos auxiliares	Transformador

#### 2.2.4 Lâmpada LED (*Light Emitting Diode*)

O funcionamento de um *LED* (Díodo Emissor de Luz) é baseado na emissão de luz, por eletroluminescência, através de um díodo semicondutor. É usualmente uma fonte de luz com uma pequena área onde se aplica uma lente para projetar a luz emitida. A cor da luz emitida pode variar conforme o tipo de material semicondutor utilizado, podendo ser infravermelha, visível ou até ultravioleta. Na figura 2.23 é possível observar um esquema bastante simples da constituição de um *LED*.

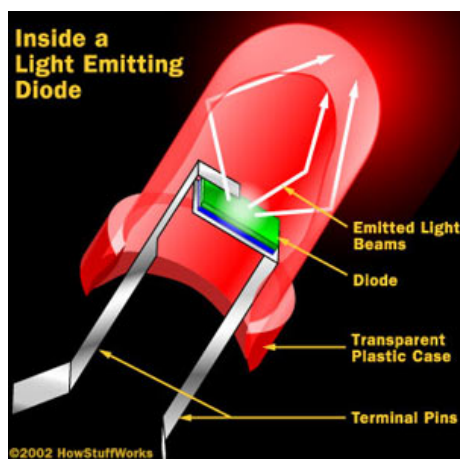


Figura 2.23: Esquema interior de um LED (diodo emissor de luz) [22]

A combinação de *LED*'s vermelhos, verdes e azuis permite produzir uma luz de cor branca, no entanto, existe atualmente um *LED* branco. O princípio de funcionamento do *LED* branco é similar ao utilizado nas lâmpadas fluorescentes: quando é depositado fósforo no material semicondutor de um *LED* ultravioleta a conversão de luz ultravioleta é realizada para luz branca.

Também existe outro tipo de *LED*'s, denominado *OLED* (*Organic Light Emitting Diode*), que possui emissores constituídos por compostos orgânicos, moléculas de carbono, que emitem luz ao receber carga elétrica. O *OLED*, sendo composto por moléculas, pode ser aplicado diretamente sobre a superfície de uma tela, usando um método de impressão.

A simplicidade da tecnologia *LED* permite uma grande versatilidade. Durante os últimos anos foram desenvolvidas inúmeras soluções que permitem comercializar esta tecnologia com vários tipos de configurações, permitindo assim competir com todos os tipos de lâmpadas. Na figura 2.24 são apresentados vários tipos de configurações de lâmpadas *LED* com casquilhos de diferentes tipos e dimensões.



Figura 2.24: Diferentes configurações de lâmpadas LED Philips [23]

Atualmente existem também *LED's* em forma tubular, que permitem substituir as lâmpadas fluorescentes tubulares sem a necessidade de se modificar as luminárias.



Figura 2.25: LED tubular Philips [24]

As lâmpadas *LED* possuem um elevado rendimento luminoso, podendo emitir luz de variadas cores, sem necessidade de recorrer a filtros específicos. Podem ser desenhadas de forma a focar a luz emitida sem recorrer a refletores externos. Quando são utilizadas com regulação de fluxo, a sua tonalidade de cor não se modifica. Este tipo de lâmpadas apresenta uma longa duração de vida e, como foi mencionado anteriormente, existem diferentes soluções de configurações permitindo assim substituir outros tipos de lâmpadas pouco eficientes, sem necessidade de alterar as luminárias ou utilizar aparelhos auxiliares.

No entanto, visto que a tecnologia utilizada ainda é bastante recente, o seu preço é um pouco elevado. Em casos de consumos energéticos elevados, onde são utilizadas soluções pouco eficientes, o preço elevado das lâmpadas *LED* não é limitativo uma vez que a poupança energética alcançada após a substituição por lâmpadas *LED* é vantajosa a longo prazo.

Por fim são apresentadas algumas características das lâmpadas na tabela 2.11.



Tabela 2.11: Valores característicos de uma lâmpada LED

Rendimento luminoso	60 a 130 (lm/W)
Índice de restituição cromática (IRC)	65 a 90
Temperatura de cor	2700 K a 4000 K
Tempo de vida útil	50000 a 100000 horas
Tempo de arranque e de re-arranque	instantâneo
Aparelhos auxiliares	ligação direta à rede

### 2.2.5 Comparação de Características

Tendo em conta o tipo de lâmpadas analisadas anteriormente, é interessante reunir alguns dos dados mais importantes que são relevantes quando é necessário comparar e escolher a fonte luminosa mais vantajosa. Na tabela 2.12 são apresentadas três características, rendimento luminoso, vida útil e IRC (Índice de Restituição Cromática).

Tabela 2.12: Características dos diversos tipos de lâmpadas

Família	Tipo de Lâmpada	Rendimento Luminoso (lm/W)	Vida Útil (horas)	Índice de Restituição Cromática
Lâmpadas de Descarga de Alta Pressão	Vapor de Mercúrio	30 a 60	10.000 a 12.000	40 a 57
	Vapor de Sódio	66 a 130	12.000 a 18.000	25 a 80
	Iodetos Metálicos	60 a 96	3.000 a 9.000	85 a 95
	Luz Mista	20 a 30	3.000 a 10.000	60
Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão	Fluorescente Tubular	58 a 104	7.500 a 12.000	85 a 95
	Fluorescente Compacta	40 a 70	8.000	82
	Vapor de Sódio	100 a 200	12.000 a 16.000	3
Lâmpadas de Indução	-	92	100.000	83
Lâmpadas de Incandescência	Convencional	10 a 13	1 000	100
	Halogéneo	16 a 25	2.000 a 4.000	100
Lâmpadas LED	-	60 a 130	50.000 a 100.000	65 a 90

É possível verificar que as lâmpadas incandescentes apresentam um rendimento luminoso e uma vida útil muito inferiores às restantes alternativas apresentadas. Existem também tipos de lâmpadas que, mesmo garantindo um rendimento luminoso elevado e uma vida útil extremamente elevada, apenas permitem uma utilização em casos específicos uma vez que o seu índice de restituição cromática é muito baixo, como é o caso das lâmpadas de descarga de baixa pressão a vapor de sódio.

As lâmpadas *LED* apresentam bom rendimento luminoso, vida útil muito longa e uma boa restituição de cores.

É importante referir que a escolha do tipo de lâmpada mais favorável não vai depender apenas das características apresentadas, existem vários fatores que influenciam essa escolha, sendo um

deles o preço do produto. Lâmpadas mais eficientes normalmente apresentam tecnologia mais recente, o que implica um preço final de produto mais elevado. Dependendo de cada situação e dos consumos que existem é necessário realizar um estudo mais aprofundado de forma a concluir qual a alternativa mais vantajosa.

## 2.3 Dispositivos Auxiliares

As lâmpadas de descarga utilizam um conjunto de dispositivos necessários para o seu arranque, estabilização e compensação do fator de potência. Seguidamente são apresentados os dispositivos auxiliares utilizados em conjunto com as lâmpadas de descarga [11], [10], [13], [14].

### 2.3.1 Arrancadores

O arrancador é utilizado no arranque das lâmpadas fluorescentes e consiste numa ampola cheia de gás, árgon a baixa pressão. No seu interior existem dois elétrodos, um fixo e outro constituído por uma lâmina bimetálica que pela ação do calor se pode dobrar ligeiramente. Quando existe contacto entre os dois elétrodos, a descarga é interrompida e estes voltam a abrir o circuito. A existência de um balastro no circuito permite introduzir uma indutância que, com a interrupção do contacto no arrancador, vai provocar uma sobretensão, para efetuar o arranque da lâmpada [13].

Na figura 2.26 é apresentado um circuito com uma lâmpada fluorescente tubular ligada a um arrancador e a um balastro.

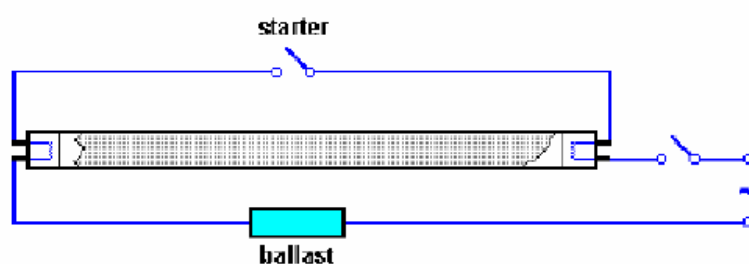


Figura 2.26: LED tubular [24]

Resumindo, o papel de um arrancador é fechar o circuito de pré-aquecimento quando lhe é aplicada uma tensão e abrir o circuito quando esse pré-aquecimento é suficiente.

Na figura 2.27 é apresentado um arrancador da *Philips*, denominado *Smart Starter*, que pode ser programado para ligar ou desligar automaticamente uma lâmpada fluorescente.



Figura 2.27: Arrancador *Smart Starter Philips* [25]

### 2.3.2 Ignitores

Os ignitores são utilizados no arranque das lâmpadas de vapor de mercúrio de iodetos metálicos e nas lâmpadas de vapor de sódio. A função de um ignitor é de produzir uma descarga inicial, injetando impulsos de alta tensão superiores à tensão de alimentação da lâmpada, após o seu arranque. Uma vez realizado o arranque o ignitor desliga-se automaticamente. O pico de tensão produzido pelo ignitor é necessário para facilitar o início da descarga no gás uma vez que apenas a corrente existente no circuito não é suficiente para o arranque das lâmpadas mencionadas.

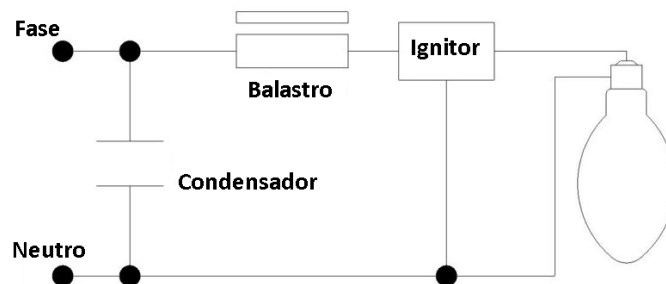


Figura 2.28: Circuito com um condensador, balastro, ignitor e lâmpada [26]

Na figura 2.28 é possível observar um circuito onde está representada a ligação de um ignitor. Na figura 2.29 é apresentado um ignitor eletrónico.



Figura 2.29: Ignitor eletrónico da *Philips* [27]

### 2.3.3 Condensadores de Compensação

Os condensadores de compensação são utilizados para compensar o fator de potências das lâmpadas de descarga uma vez que o uso do conjunto ignitor e balastro eletromagnético provoca um fator de potência fortemente indutivo; o condensador vai então gerar energia reactiva. Possuem um interruptor de segurança interno que atua em caso de falha do aparelho ou quando este se aproxima do seu limite de vida.

A não utilização de um condensador de compensação iria condicionar o funcionamento do sistema e comprometer a vida útil dos equipamentos devido ao excesso de energia reativa.



Figura 2.30: Condensadores de compensação Amber [28]

### 2.3.4 Balastros

Os balastros são equipamentos auxiliares elétricos que permitem limitar o valor da corrente e adequar as tensões, sendo necessários para o arranque e estabilização das lâmpadas de descarga. Podemos então definir três importantes funções que um balastro tem que cumprir:

1. Pré-aquecer os elétrodos para que os eletrões sejam emitidos
2. Produzir a tensão de arranque necessária para dar início à descarga
3. Limitar o valor da corrente de funcionamento para um valor adequado

Existem dois tipos de balastros, eletromagnéticos e eletrónicos.

#### 2.3.4.1 Balastros Eletromagnéticos

Os balastros eletromagnéticos são constituídos por um núcleo laminado composto por aço silício e por bobinas de fio de cobre esmaltado que estão enroladas à volta do núcleo ferromagnético. Este tipo de balastros é normalmente utilizado em conjunto com um arrancador, no entanto,

existem outros tipos de balastros eletromagnéticos que são utilizados com lâmpadas de arranque rápido, com elétrodos pré-aquecidos e com um circuito semi-ressonante.

Uma grande desvantagem deste tipo de equipamentos está relacionada com a sua contribuição para um maior consumo energético, ou seja, a potência máxima absorvida pelo conjunto lâmpada e balastro é superior. A sua baixa eficiência energética, elevadas perdas e contribuição para um aumento dos consumos dos equipamentos foi uma das razões para a proibição de algumas das classes destes equipamentos com menor eficiência energética. Atualmente existem algumas soluções mais eficientes, mas a tendência futura será para a utilização de balastros eletrónicos.



Figura 2.31: Balastro eletromagnético *Philips* [29]

#### 2.3.4.2 Balastros Eletrónicos

Os balastros eletrónicos são mais eficientes do que os eletromagnéticos e não necessitam de ignitores ou condensadores de compensação, conseguindo garantir uma corrente relativamente constante na lâmpada. Este tipo de balastros consegue melhorar o rendimento das lâmpadas convertendo a frequência da rede em alta frequência. Quando uma lâmpada funciona a altas frequências a quantidade de luz que produz é a mesma, mas o seu consumo é bastante mais reduzido, ou seja, necessita de menor potência para emitir o mesmo fluxo luminoso. É possível então implementar sistemas de iluminação mais eficientes.

Com a utilização de balastros eletrónicos é possível obter um conjunto de vantagens muito importantes para o funcionamento do sistema de iluminação [11]:

- **Aumento do rendimento luminoso** - Para a mesma potência absorvida é possível elevar o fluxo luminoso da lâmpada o que implica então um aumento do rendimento luminoso.
- **Diminuição da potência absorvida** - Também é possível reduzir a potência absorvida e manter o mesmo fluxo luminoso da lâmpada. Além disso o balastro eletrónico apresenta consumos de potência mais reduzidos do que um balastro eletromagnético, isto porque a lâmpada vai funcionar a alta frequência.

- **Controlo do fluxo luminoso** - Os balastros eletrónicos permitem uma regulação do fluxo luminoso o que permite poupar bastante energia. Quando integrados com outro tipo de equipamentos é possível programar o sistema de iluminação para adequar o fluxo luminoso de acordo com o nível de iluminância necessário e para desligar o sistema quando não é necessário.
- **Eliminação do efeito de flicker** - O efeito de flicker<sup>1</sup> manifesta-se como uma impressão visual que resulta das variações do fluxo luminoso de uma lâmpada que funciona a baixas frequências. Com os balastros eletrónicos a lâmpada funciona a alta frequência sendo então a emissão de luz contínua, o efeito é então eliminado [30].

Na figura 2.32 é apresentado um balastro eletrónico.



Figura 2.32: Balastro eletrónico *Philips* [31]

## 2.4 Luminárias

O elemento mais importante de um sistema de iluminação, além da lâmpada, é a luminária. Esta tem um grande impacto na quantidade de luz, emitida pela lâmpada, que alcança a área a iluminar, bem como no seu padrão de distribuição. Deve ser realizado um estudo do ponto de vista luminotécnico relativamente às luminárias, para que o rendimento seja máximo e de forma a obter uma distribuição luminosa adequada ao seu propósito.

Os dados fotométricos relativos à luminária são geralmente fornecidos pelo fabricante. Esses dados usualmente incluem um diagrama polar onde é possível observar as curvas que indicam a intensidade luminosa em função da direção para uma determinada fonte luminosa em coordenadas polares. Na figura 2.33 é apresentado um exemplo de um diagrama polar de uma luminária de iluminação interior.

Os diagramas polares, também denominados curvas de distribuição de intensidade luminosa, são usualmente expressos em candela por lúmen (cd/lm), sendo a escala mais utilizada a de uma candela por mil lúmen (cd/1000lm). As diversas curvas apresentadas demonstram os valores de

<sup>1</sup>O efeito de flicker é um fenómeno provocado por cargas em ciclo variável, cuja frequência de operação produz uma modulação da magnitude da tensão da rede [30]

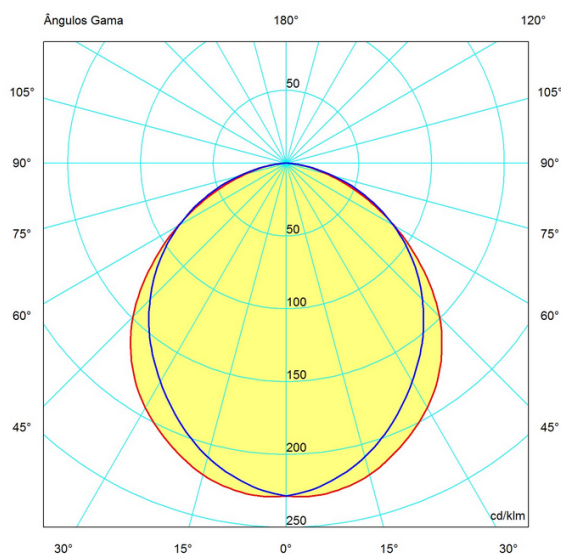


Figura 2.33: Diagrama polar de uma luminária de iluminação interior [32]

intensidade luminosa para mais do que um plano de referência, sendo que o eixo de zero graus, ( $0^\circ$ ), corresponde à direção vertical e o eixo de noventa graus, ( $90^\circ$ ), corresponde à direção horizontal [33].

A escolha do tipo de luminária vai depender do sistema de iluminação pretendido, ou seja, existem diferentes orientações de iluminação que podem ser escolhidas de acordo com a área que se pretende iluminar. Podemos definir então os seguintes tipos de iluminação [14]:

- **Iluminação direta** - O fluxo luminoso é totalmente direcionado para a superfície que se pretende iluminar. Evita-se perdas de iluminação por reflexão no teto ou paredes, mas existe encandeamento e sombras.
- **Iluminação semi-direta** - Uma grande percentagem do fluxo luminoso é direcionado para a superfície a iluminar, a restante é direcionada noutras direções. É possível reduzir significativamente o nível de sombreamento.
- **Iluminação difusa** - Distribuição do fluxo luminoso em várias direções evitando-se zonas de sombreamento e reduzindo significativamente o encandeamento. No entanto, uma grande percentagem do fluxo luminoso alcança a área a iluminar por reflexão no teto e paredes.
- **Iluminação semi-indireta** - Uma grande percentagem do fluxo luminoso é direcionado para o teto permitindo evitar o encandeamento. O rendimento luminoso alcançado é muito reduzido uma vez que a iluminação é maioritariamente absorvida pelo teto e paredes.
- **Iluminação indireta** - Uma percentagem muito alta ou total do fluxo luminoso é direcionada para o teto. O encandeamento é completamente anulado, no entanto, o rendimento

luminoso é muito fraco permitindo obter um nível de luminância na área a iluminar muito reduzido.

Na figura 2.34 é apresentado um esquema muito simples onde é possível observar diferentes tipos de iluminação, sendo o primeiro caso iluminação direta, o segundo iluminação indireta e o terceiro caso representa uma iluminação mista (difusa, semi-direta ou semi-indireta).

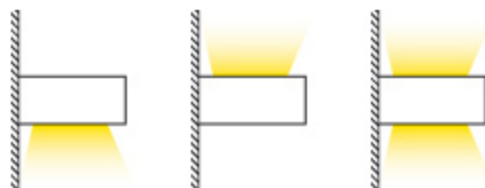


Figura 2.34: Exemplo de tipos de iluminação [34]

### 2.4.1 Luminárias para Iluminação Interior

Existem diversos tipos de luminárias para diferentes tipos de montagens, iluminação desejada, tipos de lâmpadas, tipo de local, entre outros. Seguidamente são apresentados os tipos de luminárias mais usuais na iluminação interior, [11], [35], [10], [13], [14].

#### 2.4.1.1 Luminárias Encastradas



Figura 2.35: Luminária encastrada [35]

As luminárias de montagem encastrada são geralmente utilizadas em tetos falsos e na sua grande maioria são desenvolvidas para trabalhar com lâmpadas fluorescentes. São luminárias que apresentam um grande diversidade de óticas com diferentes refletores e placas prismáticas, permitindo diferentes efeitos de iluminação. Permitem um controlo de luz elevado devido aos refletores, grelhas e lâminas que possuem, possibilitando direcionar a luz emitida e reduzir a luminância nas



direções sujeitas a causar encandeamento. As configurações que permitem utilizar diversas lâmpadas permitem um controlo de vários tipos de luminância, o que implica uma maior versatilidade do sistema de iluminação. Este tipo de luminária é muito utilizada em iluminação de escritórios e de espaços comerciais.

#### 2.4.1.2 Luminárias de Montagem Suspensa



Figura 2.36: Luminária de montagem suspensa [35]

As luminárias de montagem suspensa apresentam uma construção bastante simples o que permite uma montagem fácil e custos de manutenção reduzidos. Em instalações industriais, para alturas de montagem superiores a seis metros, são geralmente utilizadas com lâmpadas de descarga de alta pressão permitindo uma fácil manutenção. Algumas configurações apresentam um revestimento em vidro de sílica pura sobre a chapa de alumínio permitindo uma elevada resistência à corrosão. Os refletores utilizados neste tipo de luminárias são geralmente prismáticos ou metálicos apresentando em alguns casos uma superfície interna multi-face que permite obter um elevado rendimento luminoso.

#### 2.4.1.3 Luminárias de Montagem Saliente



Figura 2.37: Luminária de montagem saliente [35]

As luminárias de montagem saliente apresentam várias configurações e são compatíveis com os diversos tipos de lâmpadas. A sua montagem é relativamente fácil e geralmente são de construção robusta, o que permite a sua utilização em espaços com condições muito específicas.

### **Luminárias de Montagem Saliente Estanques**



Figura 2.38: Luminária de montagem saliente estanque [35]

As luminárias estanques são utilizadas em espaços com condições adversas, como por exemplo áreas de risco de incêndio ou de explosão, locais húmidos ou onde existe a possibilidade de penetração de água na luminária, zonas com grandes quantidades de poeira, entre outros. Existem diferentes configurações de luminárias estanques dependendo do tipo de condições em que vão ser utilizadas.

Uma configuração possível é a luminária estanque com lâmpadas expostas, possuindo apenas as ligações entre as lâmpadas e os suportes estanques, sendo ideal para locais com grandes quantidades de poeira e elevada humidade. Na configuração apresentada na figura 2.38, a luminária possui as lâmpadas protegidas por um difusor em material plástico, sendo a luminária totalmente estanque.

Para condições mais adversas, áreas com risco de incêndio ou de explosão, as luminárias utilizadas apresentam uma construção mais robusta com uma caixa em aço e difusor em vidro do tipo duro, capaz de resistir a explosões evitando assim uma eventual origem de incêndio.

### **Luminárias de Montagem Saliente do tipo Régua**

As luminárias do tipo régua apresentam um controlo de luz muito reduzido, uma vez que apenas utilizam um suporte para a montagem da lâmpada sem a utilização de grelhas ou

refletores. No entanto, como este tipo de luminárias possui uma construção bastante simples, a sua dimensão é reduzida, o que permite a sua utilização em espaços pequenos.



Figura 2.39: Luminária de montagem saliente do tipo régua [35]

Na figura 2.39 é possível observar uma luminária do tipo régua com um módulo *LED* integrado, o que permite uma instalação simples. Existem algumas configurações estanques usualmente com lâmpada exposta e suportes estanques.

#### 2.4.1.4 Luminárias do tipo *Downlight*



Figura 2.40: Luminária do tipo *Downlight* [35]

As luminárias do tipo *Downlight* são usualmente utilizadas com lâmpadas de baixo consumo, maioritariamente lâmpadas de halogéneo e lâmpadas *LED*. Este tipo de luminárias é constituído essencialmente por um invólucro e uma ótica, usualmente fabricados em alumínio; a ótica dependendo da configuração pode ser fixa ou ajustável. Os refletores utilizam uma técnica denominada *Darklight* que relaciona o ângulo de *cut-off*<sup>2</sup> da lâmpada e do refletor. Com esta técnica é possível atenuar o efeito de encandeamento direto sem reduzir o rendimento luminoso do conjunto lâmpada e luminária.

Existem então luminárias do tipo *Downlight* com diferentes ângulos de *cut-off*. Conforme o tipo de local é importante estudar qual o tipo de luminária mais adequada. Para locais de altura mais elevada é indicado escolher uma luminária com um ângulo de *cut-off* maior e para locais com pouca altura luminárias com um ângulo de *cut-off* menor.

---

<sup>2</sup>O ângulo de *cut-off* é o ângulo formado entre o teto (horizontal) e uma reta imaginária que passa no extremo do refletor, tangente à lâmpada. Se o nosso campo visual estiver situado dentro deste ângulo não é possível ver a lâmpada diretamente

#### 2.4.1.5 Luminárias com Calha Eletrificada



Figura 2.41: Luminária com calha eletrificada [35]

A utilização de luminárias com calha eletrificada é importante quando se pretende um controlo de luz minucioso. É usualmente utilizado em estabelecimentos comerciais onde o controlo de luz é de elevada importância. Este tipo de luminária é utilizado para iluminar pequenas áreas ou objetos sendo possível direcionar a luz emitida com elevado pormenor devido às diferentes funcionalidades de construção, dobradiças, suportes, caminho em calha, entre outros. No entanto, para iluminar grandes áreas não é uma solução viável.

## 2.5 Resumo

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma abordagem a diversos conceitos e grandezas de luminotecnia que são essenciais para o entendimento de todos os processos envolvidos no dimensionamento de sistemas de iluminação. Os sistemas de iluminação são essencialmente constituídos por dois tipos de equipamentos, as luminárias e as lâmpadas. A abordagem apresentada aos diversos tipos de lâmpadas e luminárias existentes permite compreender os múltiplos fatores em causa quando se pretende configurar um sistema de iluminação.

Com este capítulo, pretende reunir-se a informação necessária ao entendimento do tipo de sistemas utilizados na ferramenta desenvolvida que conduziu à escrita deste Dissertação.

## Capítulo 3

# Dimensionamento de um Sistema de Iluminação

Neste capítulo é realizada uma abordagem ao dimensionamento de um sistema de iluminação. Na secção 3.1 é apresentada uma metodologia de cálculo luminotécnico que representa a fase inicial de um projeto. Na secção 3.2 é apresentada uma abordagem à fase seguinte de um projeto de um sistema de iluminação, ou seja, são apresentadas algumas grandezas que permitem calcular a eficiência do sistema projetado e comparar diferentes sistemas. Por fim, na secção 3.3, é realizada uma abordagem ao cálculo de rentabilidade de um sistema onde são apresentados custos relevantes e como pode ser calculado o retorno de um investimento.

### 3.1 Cálculo Luminotécnico

Os cálculos luminotécnicos são usualmente realizados durante a fase de projeto de um sistema para se obter informação sobre o desempenho desse sistema. A partir desses cálculos é possível comparar diferentes configurações e perceber qual a melhor solução possível.

Este tipo de cálculos permite obter simulações próximas da realidade, mas como são utilizados modelos com várias aproximações e simplificações os resultados não são totalmente corretos e dependendo do tipo de método utilizado a rapidez de cálculo e a exatidão de resultados pode variar [36].

#### 3.1.1 Método do Fator de Utilização

O método do fator de utilização permite um cálculo rápido da quantidade de luminárias que é necessário implementar para garantir os níveis de iluminância desejados de acordo com os requisitos do recinto em questão. Este método é prático e de fácil utilização, não deve ser utilizado quando se pretende obter resultados precisos, mas sim quando se pretende estimar soluções e obter

diferentes simulações de configurações possíveis a utilizar.

Para a utilização deste método ser possível é necessário cumprir os seguintes requisitos [36]:

- O recinto em estudo tem que apresentar forma paralelepípedica;
- As paredes do recinto em estudo têm que apresentar um fator de reflexão uniforme, ou seja, cor e material uniforme;
- O plano de trabalho a iluminar tem que ser horizontal;
- Apenas pode ser utilizada um tipo de luminária;
- A orientação das luminárias tem que ser igual;

A utilização deste método implica conhecer as características da luminária a utilizar, da lâmpada, da cor e do material das paredes e teto e também das dimensões do recinto em estudo. O método é então constituído pelos seguintes passos [6], [9], [10], [36]:

## 1. Determinar o nível de iluminância adequado ao recinto em estudo

O nível de iluminância de um determinado recinto deve ser escolhido de acordo com os requisitos do tipo de tarefas realizadas nesse recinto. Um nível de luz correto garante condições visuais necessárias para que o trabalho efetuado seja eficiente e preciso.

Na tabela 3.1 são apresentados alguns níveis de iluminância adequados a cada tipo de tarefa a realizar. Os valores apresentados são uma demonstração, deve ser consultada a norma europeia em vigor (*EN 12464-1*) onde são apresentados com detalhe os níveis de iluminância adequados a cada tipo de tarefa [37].

Tabela 3.1: Níveis de iluminância adequados a diferentes tarefas ou atividades [37]

Níveis de Iluminância (lux)	Tipo de tarefas ou atividades
20 - 50	Áreas exteriores de circulação e acesso
50 -100- 150	Zonas interiores de circulação, corredores, escadas
150 - 200 - 300	Zonas utilizadas por períodos curtos, átrios, armazéns
300 - 500 - 750	Trabalhos normais, escritórios e fábricas
750 - 1000	Tarefas com necessidade de elevada acuidade visual
1000- 1500 - 2000	Trabalhos especiais, inspeção, gravação
2000 - 3000 - 5000	Trabalho contínuo e preciso, eletrónica

## 2. Calcular o índice do recinto

O índice do recinto representa a relação entre as dimensões do recinto e a distância entre a luminária e o plano de trabalho que se pretende iluminar.

$$K = \frac{cl}{(c+l)h_u} \quad (3.1)$$

em que,

K - índice do recinto

c - comprimento do recinto

l - largura do recinto

$h_u$  - altura útil

A altura útil representa a distância entre a fonte de luz e o plano de trabalho. Se subtrairmos à altura total da sala, H, a altura do plano de trabalho e a altura a que está posicionada a luminária obtemos então a altura útil,  $h_u$ . Na figura 3.1 é apresentado um esquema onde é possível observar uma representação da altura útil.

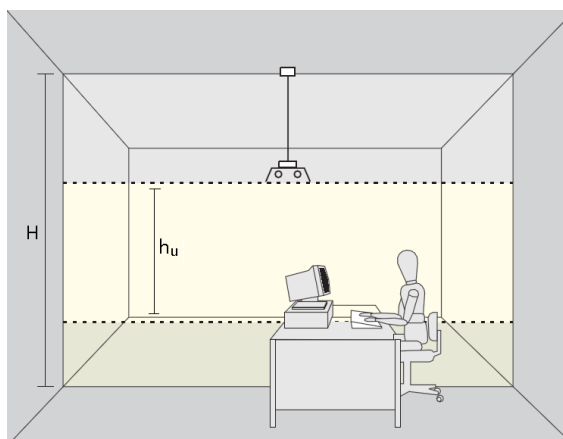


Figura 3.1: Altura útil ( $h_u$ ) [6]

### 3. Escolher o tipo de luminária e de lâmpada a ser utilizado

A escolha do tipo de luminária e do tipo de lâmpada depende do tipo de recinto e do tipo de tarefas e atividades realizadas. Como foi referido na secção 2.4.1 do capítulo anterior, a escolha da luminária adequada depende do nível de iluminância necessária para o recinto, da necessidade de controlar a orientação da iluminação e também das condições que o recinto apresenta, caso seja necessário utilizar luminárias de construção mais robusta preparadas para condições mais exigentes.

É também necessário pensar no conjunto lâmpada e luminária uma vez que determinado tipo de luminárias permite a utilização de um maior número de lâmpadas ou apresenta um conjunto de funcionalidades que permitem elevar significativamente o rendimento luminoso do conjunto.

No entanto, a escolha mais importante para o dimensionamento do sistema de iluminação é a lâmpada. Essa escolha vai depender do número de horas de uso da iluminação, da frequência de utilização do espaço, da obrigatoriedade, ou não, de ter uma restituição de cores elevada, do tipo de tarefa realizada no recinto, o que implica uma temperatura de cor da lâmpada diferente (locais de trabalho requerem a utilização de uma fonte de luz com temperatura de cor "fria" e locais de descanso uma temperatura de cor "quente") [6].

A escolha da luminária e da lâmpada permite então obter os seguintes dados:

- Fluxo luminoso da lâmpada
- Potência da lâmpada
- Tabela de fator de utilização da luminária
- Número de lâmpadas por luminária

4. **Determinar o fator de utilização da luminária tendo em conta o índice do recinto e os coeficientes de reflexão das paredes e do teto**

O cálculo do fator de utilização é realizado recorrendo à tabela de fator de utilização da luminária escolhida, fornecida pelo fabricante. Uma tabela de fator de utilização de uma luminária possui vários valores que estão organizados de acordo com diferentes índices de recinto e diferentes coeficientes de reflexão. Para obter o fator de utilização é necessário cruzar o valor de índice de recinto calculado anteriormente com os coeficientes de reflexão do recinto.

Na tabela 3.2 é apresentado um exemplo de tabela de fator de utilização de uma luminária onde é possível observar um cruzamento de valores de índice de recinto e de coeficientes de reflexão para se obter o fator de utilização.

Tabela 3.2: Tabela de fator de utilização exemplo [33]

TETO (%)	70			50			30		0
PAREDE (%)	50	30	10	50	30	10	30	10	0
PISO (%)	10			10			10		0
Kr	Fator de utilização								
0,60	34	29	26	33	29	26	29	26	25
0,80	40	36	33	39	35	32	35	32	31
1,00	45	41	38	44	41	38	40	38	36
1,25	50	46	43	49	45	43	45	42	41
1,50	53	50	47	52	49	46	48	46	45
2,00	58	55	52	56	54	52	53	51	50
2,50	60	58	56	59	57	55	56	55	53
3,00	62	60	58	61	59	58	58	57	55
4,00	64	63	61	63	62	60	61	59	58
5,00	66	64	63	64	63	62	62	61	59

Os coeficientes de reflexão são calculados tendo em conta a cor e o material das paredes, teto e solo do recinto.



Tabela 3.3: Coeficientes de reflexão [6]

Cor/Material	Coeficiente de reflexão (%)
Branco	70 a 80
Bege	25 a 35
Amarelo	55 a 65
Azul claro	40 a 45
Verde claro	45 a 50
Preto	5 a 10
Vidro	6 a 8
Rocha	60
Madeira clara	40

Na tabela 3.3 são apresentados alguns coeficientes de reflexão para diferentes cores e tipos de materiais. Tal como foi referido na secção 2.1, conforme a cor ou material da superfície existe maior ou menor reflexão da luz fazendo variar o fluxo luminoso que alcança o plano a iluminar.

## 5. Determinar o fator de manutenção

O fator de manutenção relaciona o fluxo emitido no fim do período de manutenção da luminária e o fluxo luminoso inicial da mesma. É necessário ter em conta o tipo de ambiente do recinto em estudo e a frequência com que é realizada a manutenção das luminárias e lâmpadas. Quanto melhor for a manutenção dos equipamentos, com maior frequência, mais alto será o fator, o que implica também um custo maior.

Usualmente, os sistemas de iluminação são sobredimensionados uma vez que os valores de iluminância projetados podem ser reduzidos devido ao envelhecimento das lâmpadas e ao pó que se deposita nos equipamentos, o que limita o fluxo luminoso que alcança a superfície a iluminar [38]. Na tabela 3.4 é possível observar os diferentes valores de fator de manutenção para vários tipos de ambiente e diferentes frequências de manutenção.

Tabela 3.4: Tabela de fator de manutenção [6]

Tipo de Ambiente	Período de Manutenção		
	2500 h	5000 h	7500 h
Limpo	0,95	0,91	0,88
Normal	0,91	0,85	0,80
Sujo	0,80	0,66	0,57

## 6. Calcular o fluxo luminoso por luminária

O cálculo do fluxo luminoso por luminária é calculado através do fluxo luminoso da lâmpada escolhida e da quantidade de lâmpadas que vão ser utilizadas em cada luminária. Sendo assim, todos os dados necessários para este cálculo foram obtidos no passo número três.

Temos então que realizar o seguinte cálculo:

$$\varphi = n\phi \quad (3.2)$$

em que,

$\varphi$  - fluxo luminoso por luminária, em lúmen;

$\phi$  - fluxo luminoso por lâmpada, em lúmen;

n - número de lâmpadas por luminária;

## 7. Calcular o número de luminárias necessárias

Uma vez concluídos todos os passos anteriores, é possível então calcular o número de luminárias necessárias a utilizar no recinto em estudo para proporcionar o nível de iluminância escolhido. A equação 3.3 permite então esse cálculo:

$$N = \frac{ES}{\varphi FUFM} \quad (3.3)$$

em que,

N - número de luminárias;

E - nível de iluminância escolhido, em lux;

S - área do recinto, em metros quadrados;

$\varphi$  - fluxo luminoso por luminária, em lúmen;

FM - fator de manutenção;

FU - fator de utilização;

## 8. Determinar o espaçamento entre luminárias

Para que a distribuição de luminárias no recinto seja uniforme, é usual a utilização de um espaçamento de 1 a 1,5 vezes a altura entre a luminária e o plano de trabalho. É importante ter em conta a configuração do recinto, a orientação das luminárias, os pontos que são importantes iluminar e a dimensão das luminárias. Um espaçamento, tal como apresentado na figura 3.2, permite uma distribuição uniforme em relação ao espaço disponível de montagem no teto em relação à distância entre paredes do recinto. É utilizada uma distância de espaçamento entre luminárias igual ao dobro da distância entre a luminária e as paredes.

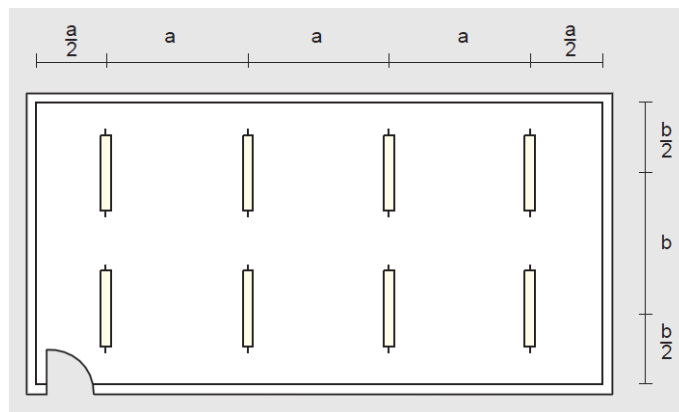


Figura 3.2: Distribuição de luminárias tendo em conta as paredes do recinto [33]

### 3.1.2 Software Específico

A utilização de um método de cálculo como o método do fator de utilização permite obter uma simulação do sistema que se pretende estudar, mas quando se trata de sistemas mais complexos ou quando é necessário dimensionar vários projetos, seguir esta metodologia não é a melhor opção.

Existem atualmente diversos tipos de *software* de cálculo luminotécnico que utilizam diferentes modelos de cálculo, que possibilitam a simulação de sistemas de iluminação complexos e a obtenção dos consumos energéticos para esses sistemas. Alguns destes programas possuem bases de dados com toda a informação referente aos diferentes tipos de luminárias e lâmpadas existentes no mercado e proporcionam um ambiente gráfico, onde é possível configurar um sistema de iluminação e distribuir todos os componentes tendo em conta as dimensões reais dos recintos em estudo.

Na figura 4.4 é apresentado um exemplo de um ambiente gráfico desenvolvido em *software* de cálculo luminotécnico denominado *DIALux*.



Figura 3.3: Ambiente gráfico de um projeto realizado em *DIALux* [39]

## 3.2 Eficiência do Sistema de Iluminação

Para se obter a eficiência de um sistema de iluminação, após o cálculo do número de luminárias, é necessário calcular a potência instalada do sistema, que permite posteriormente calcular a potência por metro quadrado e a densidade de potência para 100 lux de iluminância. É necessário efetuar os seguintes cálculos [6]:

- Potência total instalada;
- Densidade de potência;
- Densidade de potência relativa;

Usando estes cálculos, é possível comparar diferentes simulações relativamente à sua eficiência e perceber o tipo de consumos que os sistemas dimensionados apresentam.

### 3.2.1 Potência Total Instalada

O cálculo da potência total instalada do sistema é realizado utilizando todos os equipamentos que consomem energia, lâmpadas, dispositivos auxiliares (Balastros, Ignitores e Transformadores).

$$P_t = \frac{WNn}{1000} \quad (3.4)$$

em que,

$P_t$  - potência total instalada do sistema, em Kilowatt;

$W$  - potência do conjunto lâmpada e dispositivos auxiliares, em Watt;

$N$  - número de luminárias;

$n$  - número de lâmpadas por luminária;

É possível também utilizar as seguintes equações para o cálculo de potência total instalada caso o tipo de balastros utilizados no sistema sejam unicamente balastros eletrônicos:

$$P_t = \frac{WNn(1.1)}{1000} \quad (3.5)$$

Caso o tipo de balastros utilizados no sistema sejam unicamente balastros eletromagnéticos:

$$P_t = \frac{WNn(1.2)}{1000} \quad (3.6)$$

O fator utilizado nas equações permite uma aproximação da potência consumida pelo conjunto lâmpada e balastro.

### 3.2.2 Densidade de Potência

A densidade de potência representa a potência total instalada por metro quadrado. É muito importante conhecer esta grandeza uma vez que permite perceber o nível de consumo do sistema, sendo muito utilizada em cálculos de sistemas de climatização [6].

$$D = \frac{P_t 1000}{A} \quad (3.7)$$

em que,

D - densidade de potência, em Watt por metro quadrado;

$P_t$  - potência total instalada do sistema, em Kilowatt;

A - área do recinto, em metros quadrados;

No entanto, para comparar diferentes sistemas, não é possível utilizar a densidade de potência porque é necessário conhecer também o nível de iluminância garantindo pelos sistemas. Comparando a densidade de potência de dois sistemas, apenas permite perceber qual consome mais ou menos por metro quadrado, mas para perceber se o sistema é realmente eficiente é necessário conhecer a quantidade de energia consumida que o sistema consegue transformar em luz emitida, iluminância.

### 3.2.3 Densidade de Potência Relativa

Para que seja possível comparar a eficiência de diferentes sistemas de iluminação, é necessário calcular a densidade de potência relativa, que representa a densidade de potência total instalada para 100 lux de iluminância. Esta grandeza, sendo calculada sempre relativamente à mesma iluminância (100 lux), permite então comparar o consumo energético de diferentes sistemas.

$$D_r = \frac{D 100}{E} \quad (3.8)$$

em que,

$D_r$  - densidade de potência relativa, em Watt por metro quadrado por 100 lux;

D - densidade de potência, em Watt por metro quadrado;

E - iluminância, em lux;

### 3.3 Cálculo de Rentabilidade

Após o dimensionamento do sistema de iluminação, é necessário avaliar a viabilidade do projeto. Sendo assim, é importante analisar os custos de investimento e os custos de operação do sistema. Os custos de investimento são mais elevados quando o projeto implica a utilização de equipamento mais eficiente, logo de preço mais elevado, por outro lado, projetos com investimentos iniciais mais reduzidos podem por vezes significar custos de operação mais elevados devido aos equipamentos possuírem menor eficiência. É então importante realizar um cálculo de rentabilidade dos sistemas dimensionados para verificar em quanto tempo se consegue um retorno do investimento.

#### 3.3.1 Custos de Investimento

Os custos de investimento podem ser divididos da seguinte forma:

- **Elaboração do projeto do sistema de iluminação:**

Custos com mão de obra qualificada para modelação e projetos de sistemas de iluminação.

- **Aquisição do equipamento:**

Custos de aquisição de todos os equipamentos que constituem o sistema de iluminação, lâmpadas, luminárias, balastros, entre outros.

- **Instalação do equipamento:**

Custos com mão de obra especializada em instalação dos equipamentos que constituem um sistema de iluminação.

#### 3.3.2 Custos Operacionais

Os custos operacionais são todos os custos que resultam da operação do sistema de iluminação, ou seja, quando o sistema é instalado e entra em operação existem custos com manutenção de equipamento (reposição de equipamento e mão de obra necessária) e custos de energia consumida. Dois importantes indicadores dos custos operacionais de um sistema são o custo do consumo mensal de energia e o custo médio de reposição de lâmpadas [6], [40].

Vamos supor o seguinte sistema de iluminação presente na tabela 3.5

Tabela 3.5: Tabela de um sistema de iluminação

Sistema de iluminação exemplo	
Número de lâmpadas	10
Vida útil da lâmpada	3000 horas
Preço da lâmpada	10 euros
Potência total instalada	0.2 kW
Tempo de uso mensal da iluminação	200 horas/mês

### 3.3.2.1 Consumo Mensal

Tendo em conta o sistema de iluminação apresentado na tabela 3.5, podemos calcular o seu consumo mensal utilizando a potência total instalada e o tempo de uso mensal de iluminação.

$$\text{Consumo mensal} = P_t \times \text{Tempo de uso mensal de iluminação} \quad (3.9)$$

$$\text{Consumo mensal} = 0.2 \text{ kW} \times 200 \text{ h} = 40 \text{ kWh/mês} \quad (3.10)$$

O consumo mensal do sistema é então 40 Kilowatt hora por mês.

### 3.3.2.2 Custo do Consumo Mensal de Energia

Utilizando os dados presentes na tabela 3.5 e o cálculo de consumo mensal realizado anteriormente podemos calcular o custo do consumo mensal de energia. Utilizando como preço do Kilowatt hora<sup>1</sup> um valor exemplo de 0.12 euros é possível então calcular o custo do consumo mensal de energia do sistema.

$$\text{Custo do consumo mensal de energia} = \text{Consumo mensal} \times \text{Preço do kWh} \quad (3.11)$$

$$\text{Custo do consumo mensal de energia} = 40 \text{ kWh/mês} \times 0.12 \text{ euros} = 4.8 \text{ euros} \quad (3.12)$$

Comparando os consumos mensais e o custo do consumo mensal de energia de diferentes sistemas permite perceber qual o sistema com um consumo mais reduzido, logo mais eficiente.

<sup>1</sup>O preço do kWh representa a tarifa cobrada pelo fornecedor de energia elétrica pelo consumo de potência por hora, pode variar de acordo com o mercado (regulado ou liberalizado), nível de tensão ou com o período do dia [41]

### 3.3.2.3 Custo Médio Mensal de Reposição de Lâmpadas

O custo médio mensal de reposição de lâmpadas representa o custo de aquisição de novas lâmpadas necessárias para substituição de lâmpadas que ficam fora de serviço mensalmente. Com os dados presentes na tabela 3.5 é possível calcular o custo médio mensal de reposição de lâmpadas para o sistema apresentado.

$$\text{CMMRL} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de lâmpadas} \times \text{Tempo de uso mensal de iluminação} \times \text{Preço da lâmpada}}{\text{vida útil da lâmpada}} \quad (3.13)$$

$$\text{CMMRL} = \frac{10 \times 200 \text{ h} \times 10 \text{ euros}}{3000 \text{ h}} \quad (3.14)$$

em que,

CMMRL - custo médio mensal de reposição de lâmpadas;

Para sistemas de iluminação onde a manutenção de equipamento é de elevada dificuldade é importante estudar este indicador. No entanto, para casos mais extremos pode ser também necessário calcular o custo com mão de obra necessária para efetuar a reposição de lâmpadas. Para obter esse custo é necessário calcular o tempo mensal de reposição de lâmpadas multiplicado pelo custo de mão de obra [6].

### 3.3.3 Retorno de Investimento

Um método bastante eficaz para demonstrar a rentabilidade de um projeto passa pelo cálculo de retorno de investimento. Quando são conhecidos os dados relativos ao investimento inicial do projeto e os seus custos operacionais mensais, é possível calcular o prazo de retorno do investimento. É possível perceber em quantos meses se consegue recuperar o investimento.

Para um melhor entendimento deste tipo de cálculo relativamente a uma proposta de um sistema de iluminação, é apresentado um exemplo simplificado de um cálculo de retorno de investimento. Vamos supor que existe um sistema atual em operação e queremos avaliar a viabilidade de um sistema alternativo proposto. Na tabela 3.6 são apresentados os custos operacionais e o investimento necessário do projeto proposto e os custos operacionais do sistema atual.

Tabela 3.6: Tabela com custos de investimento e operacionais

Custos	Sistema atual	Projeto A
Custos de investimento (euros)	-	1000
Custos operacionais mensais (euros)	300	200



$$RI = \frac{\text{Custos de investimento (Projeto A)}}{\text{Custos operacionais (Sistema atual)} - \text{Custos operacionais (Projeto A)}} \quad (3.15)$$

$$RI = \frac{1000}{300 - 200} = 10 \text{ meses} \quad (3.16)$$

em que,

RI - retorno de investimento;

O prazo de retorno de investimento no projeto A é então de dez meses. O investimento de mil euros no projeto A é amortizado ao longo de dez meses porque a redução de custos mensais, após a sua implementação, permitiria poupar ao longo desse prazo o montante que teria sido investido inicialmente no projeto.

### 3.4 Resumo

Este capítulo apresenta os diversos processos envolvidos no dimensionamento de um sistema de iluminação. Com a abordagem apresentada relativamente às diferentes fases que constituem um projeto luminotécnico, pretende-se fornecer a informação necessária para um correto entendimento dos processos que constituem a ferramenta desenvolvida, que conduziu à escrita deste Dissertação.



## Capítulo 4

# Trabalho Desenvolvido

Neste capítulo é apresentada a ferramenta desenvolvida que conduziu à escrita desta dissertação. São abordadas as diferentes funcionalidades da ferramenta e é apresentado o ambiente gráfico criado e consequentemente a forma como é realizada a interação nesse ambiente com essas funcionalidades.

### 4.1 Introdução

Tal como foi referido no capítulo 1, o objetivo do trabalho é desenvolver uma ferramenta de cálculo luminotécnico e análise de sistemas de iluminação, que possa ser utilizada no local da auditoria energética, recorrendo apenas a dados referentes às instalações em estudo. Este objetivo implica que a ferramenta desenvolvida apresente uma *interface* intuitiva e uma fácil utilização. A interação do utilizador com a ferramenta tem que ser o mais simples possível para que o processo de obtenção de resultados seja bastante rápido.

Uma vez que o método utilizado para o cálculo luminotécnico, presente na ferramenta desenvolvida, foi o método do fator de utilização, apresentado no capítulo 3, na secção 3.1, o desafio seria automatizar todo o método e permitir simultaneamente ao utilizador uma introdução de dados, sem necessidade de recorrer a qualquer tipo de documentos, tabelas, normas, entre outros. A particularidade deste tipo de métodos, que podem ser usados sem a necessidade de utilizar um programa específico de cálculo, reside na necessidade de recorrer a diversos tipos de documentação, o que impossibilita a obtenção de resultados com rapidez.

Para desenvolver uma solução com as características mencionadas, foi necessário escolher um tipo de *software* capaz de fornecer as condições necessárias para o desenvolvimento do projeto. A ferramenta desenvolvida foi criada utilizando o *software* de folha de cálculo denominado *Microsoft Excel*. O *Microsoft Excel* é um programa de folha de cálculo que permite armazenar, organizar e manipular dados. A escolha deste programa para desenvolver a ferramenta mencionada teve como fundamento as seguintes razões:

- **Facilidade de utilização** - A utilização do *software Microsoft Excel* ao longo do percurso académico permitiu adquirir variados conhecimentos e experiência relativamente aos recursos que disponibiliza. A possibilidade de utilizar um *software* com o qual já existe rotina de trabalho possibilita a criação de um trabalho mais elaborado. Caso fosse escolhido um *software* com o qual não existisse ainda experiência seria necessário investir várias horas de estudo para perceber as suas funcionalidades, antes de iniciar o trabalho.
- **Acessibilidade** - A elevada popularidade do *software* utilizado permite que a utilização da ferramenta desenvolvida seja o mais abrangente possível. A utilização de um *software* mais específico poderia implicar custos acrescidos ou incompatibilidade com determinados sistemas. A utilização de um *software* que é bastante familiar também permite que a interação com a ferramenta seja facilitada caso seja necessário modificar ou acrescentar funcionalidades ou atualizar informação.
- **Versatilidade** - Os diversos mecanismos existentes no *software* escolhido permitem desenvolver uma ferramenta de cálculo estruturada, com várias opções de formulário, adição para base de dados, apresentações gráficas, entre outros.

## 4.2 Visão Geral

Para um correto entendimento das funcionalidades da ferramenta desenvolvida, é importante, em primeiro lugar, apresentar uma visão geral dos seus processos. As principais funcionalidades estão reunidas em três grandes processos, tal como apresentado na figura 4.1.

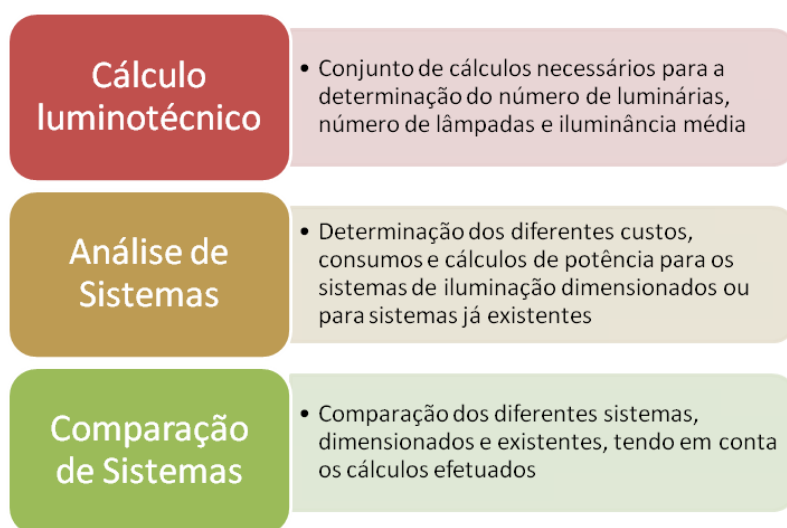


Figura 4.1: Os três grandes processos

O processo **Cálculo luminotécnico** representa todos os cálculos e procedimentos realizados para se obter uma simulação de um sistema de iluminação. No processo **Análise de Sistemas** são analisados os sistemas de iluminação simulados resultando num conjunto de dados sobre consumos, custos, cálculos de potência, entre outros. No processo **Comparação de Sistemas** são utilizados os dados que resultam do processo de **Análise de Sistemas** para apresentar uma comparação entre os diferentes sistemas de iluminação.

É importante referir que os sistemas de iluminação que representam os sistemas existentes nos recintos em estudo também são introduzidos na ferramenta e podem ser estudados no processo **Análise de Sistemas**. Os cálculos efetuados sobre a configuração existente permitem realizar uma comparação entre o sistema existente no recinto e os sistemas dimensionados.

#### 4.2.1 Cálculo Luminotécnico

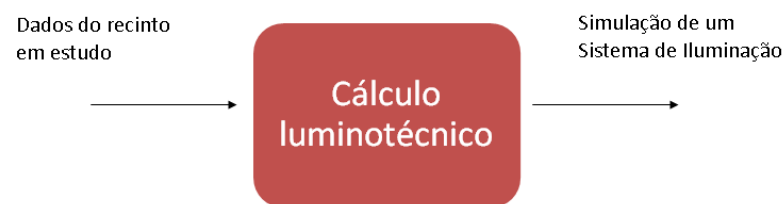


Figura 4.2: Processo cálculo luminotécnico

O cálculo luminotécnico é realizado de acordo com os dados introduzidos e as condições escolhidas pelo utilizador. Tendo em conta os dados introduzidos, é então dimensionado um sistema de iluminação. Os cálculos realizados permitem apresentar os seguintes dados para o sistema dimensionado.

Tabela 4.1: Sistema de iluminação dimensionado

Cálculo	Sigla
Altura útil	$h_u$
Área do recinto	A
Índice do recinto	K
Coefficientes de reflexão	$\rho$
Fator de utilização	FU
Fator de manutenção	FM
Fluxo luminoso por luminária	$\varphi$
Número de lâmpadas	n
Número de luminárias	N
Iluminância média	Em

Na figura 4.3 é apresentada a folha de cálculo em *Microsoft Excel* onde o processo cálculo luminotécnico é realizado.

Cálculo Luminotécnico						
Nome do Recinto	Recinto 1	Recinto 2	Recinto 3	Recinto 4	Recinto 5	
<b>Nível de iluminância desejado</b>						
Sigla	Dados	Limpar dados	Limpar dados	Limpar dados	Limpar dados	Limpar dados
E	Nível de iluminância desejado	300 Lux	300 Lux	300 Lux	300 Lux	300 Lux
<b>Dados do recinto</b>						
C	Comprimento (m)	5	10	7	12	5
L	Largura (m)	10	15	7	15	2
A	Área (m <sup>2</sup> )	50	150	49	180	10
H	Altura (m)	2.5	3	2.5	4	2.5
h	Altura da luminária (m)	0.2	0.5	0	0.4	0.5
hpt	Altura do plano de trabalho (m)	1	1.5	1.2	0.5	1
hu	Altura útil (m)	1.3	1	1.3	3.1	1
K	Índice de recinto	2.564102564	6	2.632307692	2.150537634	1.428571429
<b>Coefficiente de reflexão</b>						
	Cor do teto	Branco	Cinza claro	Branco	Verde	Cinza claro
	Cor da parede	Branco	Verde claro	Branco	Branco	Branco
	Cor do piso	Branco	Verde claro	Branco	Branco	Branco
p1	Teto	0.35	0.45	0.8	0.8	0.35
p2	Parede	0.35	0.5	0.8	0.8	0.5
p3	Piso	0.35	0.5	0.8	0.8	0.8
<b>Tipo de lâmpada</b>						
	Lâmpada	Fluorescente T5	LED	Fluorescente 28u	Vapor de sódio	Halógena
P	Potência da lâmpada (W)	30	20	28	50	30
Φ	Fluxo luminoso (lm)	3000	2000	2800	5000	1000
V	Vida útil (h)	12000	50000	70000	16000	4000
Pr	Preço da lâmpada (€)	10	17	8	25	6
	Utiliza Balastro	Elétrónico	Não	Elétrónico	Eletromagnético	Não
<b>Luminária</b>						
	Tipo	Luminária universal	Aparelho para embutir em difusor	Cabo suspenso	Aparelho em suportes ou pilóticas	Globos de vidro frescos
	Esquema					
n	Lâmpadas por luminária	Dois	Quatro	Dois	Quatro	Uma
φ	Fluxo luminoso da luminária (lm)	6000	8000	5600	20000	1000
	Tabela em uso	10	14	15	17	6
A a J	Índice de recinto	D	A	D	E	F
FU	Fator de utilização	0.53	0.43	0.68	0.48	0.35
<b>Fator de manutenção</b>						
	Ambiente	Ámbulo normal	Ámbulo limpo	Ámbulo normal	Ámbulo limpo	Ámbulo limpo
	Período de manutenção (h)	5000h	2500h	7500h	2500h	2500h
FM	Fator de manutenção	0.85	0.95	0.8	0.95	0.88
<b>Cálculos finais</b>						
N	Quantidade de luminárias	6	23	8	10	16
nl	Quantidade de lâmpadas	12	92	16	40	16
Pt	Potência total instalada (kW)	0.396	1.84	0.4328	2.4	0.48
D	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	7.9	12.3	10.1	13.3	4.8
Dr	Densidade de potência relativa (W/m <sup>2</sup> /100 lux)	2.633333333	2.46	2.02	2.66	3.6
Em	Iluminância média (lux)	324.36	501.0933333	497.3714286	506.6666667	492.8

Figura 4.3: Folha de cálculo onde é realizado o cálculo luminotécnico

É possível observar na figura 4.3 que existem cinco colunas destinadas a cinco diferentes recintos. A existência de diversas configurações em aberto permite uma modificação quando necessário o que possibilita experimentar diferentes condições e diferentes tipos de equipamentos (tipos de lâmpadas e luminárias). Esta folha de cálculo será estudada com maior pormenor na secção 4.3.

### 4.2.2 Análise de Sistemas



Figura 4.4: Processo análise de sistemas

A análise de sistemas é realizada recorrendo a sistemas de iluminação que resultam do processo cálculo luminotécnico ou então utilizando sistemas que representam sistemas de iluminação em operação no recinto em estudo. Com os dados dos sistemas de iluminação, é possível realizar diversos cálculos sobre o sistema. São estes cálculos que permitem analisar o sistemas, quanto aos seus consumos, custos que implicam, eficiência energética, entre outros. Após a análise dos sistemas, a informação resultante pode ser utilizada, posteriormente, no processo de comparação de sistemas.

Na tabela 4.2 são apresentados os diferentes cálculos que resultam da análise de um sistema de iluminação.

Tabela 4.2: Análise de sistemas

Cálculo	Sigla
Potência total instalada	$P_t$
Densidade de potência	D
Densidade de potência relativa	$D_r$
Durabilidade média das lâmpadas	DML
Custo de investimento	CI
Consumo mensal de energia	CME
Custo do consumo mensal de energia	CCME
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	CMMRL

A análise de sistemas é então realizada na ferramenta recorrendo a duas folhas de cálculo. A primeira utiliza os sistemas de iluminação dimensionados para os diferentes recintos e conforme a escolha de um sistema resulta uma análise onde são efetuados os cálculos apresentados na tabela 4.2. A segunda folha de cálculo foi desenvolvida para analisar sistemas de iluminação já existentes no recinto, sendo por isso necessário introduzir um conjunto de dados que caracterizam esse sistema para se obter posteriormente uma análise do sistema.

As duas folhas de cálculo desenvolvidas em *Microsoft Excel* são apresentadas na figura 4.5 e 4.6.

Escolher Recinto → **Escritório** **Recinto 2** **Recinto 3**  
**Recinto 4** **Recinto 5** Ínicio

Lâmpada e Balastro		
Vida útil da lâmpada	horas	12000
Preço da lâmpada	€	10
Potência da lâmpada	W	30
Quantidade de lâmpadas	n	8
Luminária		
Preço da luminária	€	25
Quantidade de luminárias	N	4
Recinto		
Comprimento do recinto	metros	1
Largura do recinto	metros	4
Nível de iluminância	lux	3111
Geral		
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	350
Custo de projeto	€	100
Custo de instalação	€	100
Preço do kWh	€	0.13

Cálculos		
Nome do Recinto	<b>Escritório</b>	
Custo de investimento	380	€
Durabilidade média das lâmpadas	130	Meses
Consumo mensal	92.4	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	12.012	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	2.333	€
Potência total instalada	0.264	kW
Densidade de potência	66	W/m2
Densidade de potência relativa	2.122	W/m2 p/100 lux



Figura 4.5: Análise de sistemas de iluminação dimensionados

Na figura 4.5 é apresentada a folha de cálculo para análise de sistemas de iluminação dimensionados no processo cálculo luminotécnico. Do lado esquerdo da folha são apresentados os dados utilizados do sistema escolhido e no lado direito são apresentados os cálculos efetuados.

**Configuração Atual** L  
 RecintoAntigo ▼ Ínicio

Lâmpada e Balastro		
Vida útil da lâmpada	horas	6000
Preço da lâmpada	€	7
Potência da lâmpada	W	50
Quantidade de lâmpadas	n	20
Luminária		
Quantidade de luminárias	N	10
Recinto		
Comprimento do recinto	metros	5
Largura do recinto	metros	10
Nível de iluminância	lux	700
Geral		
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	330
Preço do kWh	€	0,13

Cálculos		
Nome do Recinto	<b>RecintoAntigo</b>	
Custo de Investimento	0	€
Durabilidade média das lâmpadas	15,152	Meses
Consumo mensal	396	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	51,48	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	7,7	€
Potência total instalada	1,2	kW
Densidade de potência	24	W/m2
Densidade de potência relativa	3,429	W/m2 p/100 lux

Lâmpadas de descarga:  
☒ Balastro Electromagnético  
☐ Balastro Eletrónico  
 Outros tipos de lâmpadas:  
☐ Sem Balastro




Figura 4.6: Análise de sistemas de iluminação em operação

Na figura 4.6 é apresentada a folha de cálculo para análise de sistemas de iluminação em operação nos recintos em estudo. A estrutura é muito similar, a única diferença entre as duas folhas de cálculo reside na forma como é introduzido o sistema a analisar. Na secção 4.3 é efetuada uma descrição com maior detalhe sobre as diferentes funcionalidades presentes na ferramenta.



### 4.2.3 Comparação de Sistemas

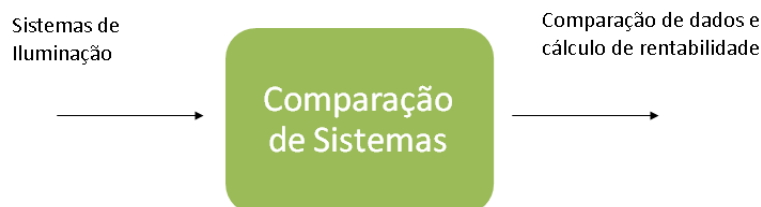


Figura 4.7: Processo comparação de sistemas

O último processo utiliza os dados que resultam da análise de sistemas para apresentar uma comparação entre diferentes cálculos para diferentes sistemas de iluminação. O objetivo da comparação de sistemas é apresentar todos os dados de forma estruturada e organizada, permitindo ao utilizador escolher a configuração adequada para o recinto em estudo. Este processo é também importante uma vez que possibilita avaliar a rentabilidade de um sistema apresentando um cálculo de retorno de investimento.

Na figura 4.8 é apresentada a folha de cálculo em *Microsoft Excel* onde o processo comparação de sistemas é realizado.

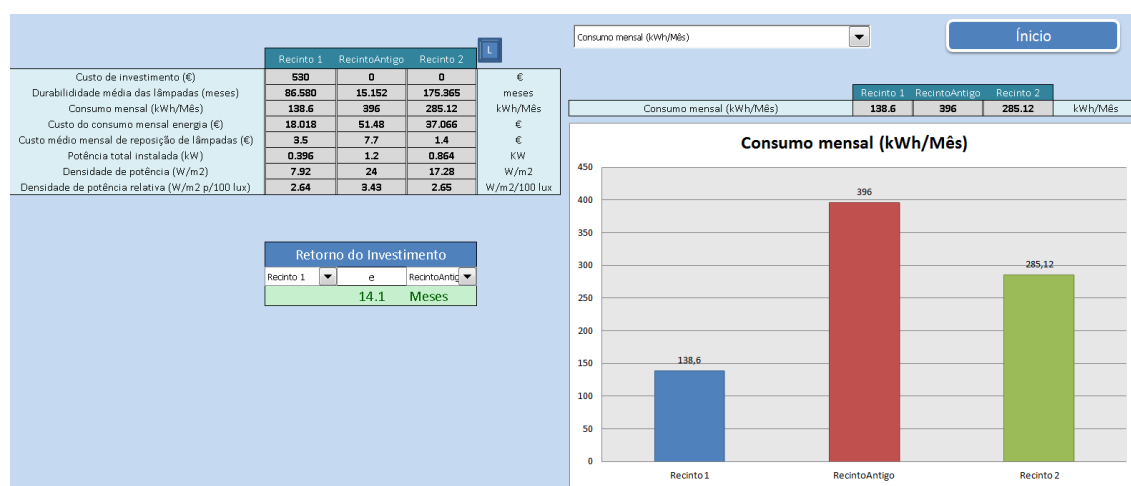


Figura 4.8: Folha de cálculo para comparação de sistemas

## 4.3 Funcionalidades

Após uma breve apresentação da ferramenta e dos principais processos envolvidos é importante explicar com maior detalhe algumas funcionalidades presentes.

Utilizando a mesma metodologia usada na secção 4.2 as funcionalidades são então apresentadas conforme os três processos: cálculo luminotécnico, análise de sistemas e comparação de sistemas.

### 4.3.1 Cálculo Luminotécnico

O cálculo luminotécnico é realizado à medida que o utilizador da ferramenta vai introduzindo os dados sobre o recinto ou escolhendo as opções que pretende implementar no sistema a dimensionar.

O primeiro passo neste processo implica escolher o nível de iluminância adequado ao espaço e inserir os dados referentes ao recinto. De acordo com as dimensões do recinto é calculada a área do espaço, a altura útil e o índice de recinto tal como apresentado na figura 4.9.

Nome do Recinto		Recinto 1	Recinto 2	Recinto 3
Nível de iluminância desejado				
Sigla	Dados	Limpar dados	Limpar dados	Limpar dados
E	Nível de iluminância desejado	300 Lux ▼	500 Lux ▼	500 Lux ▼
Dados do recinto				
C	Comprimento (m)	5	10	7
L	Largura (m)	10	15	7
A	Área (m <sup>2</sup> )	50	150	49
H	Altura (m)	2.5	3	2.5
h	Altura da luminária (m)	0.2	0.5	0
hpt	Altura do plano de trabalho (m)	1	1.5	1.2
hu	Altura útil (m)	1.3	1	1.3
K	Índice de recinto	2.564	6	2.692

Figura 4.9: Nível de iluminância e dados do recinto

De seguida é necessário escolher a cor das paredes, teto e piso para se obter os coeficientes de reflexão do recinto, tal como apresentado na figura 4.10.

Coeficiente de reflexão				
	Cor do teto	Bege ▼	Cinza claro ▼	Branco ▼
	Cor da parede	Bege ▼	Verde claro ▼	Branco ▼
	Cor do piso	Bege ▼	Verde claro ▼	Branco ▼
p1	Teto	0.35	0.45	0.8
p2	Parede	0.35	0.5	0.8
p3	Piso	0.35	0.5	0.8

Figura 4.10: Coeficiente de reflexão

Uma vez realizados os cálculos sobre os dados referentes ao recinto em estudo é necessário escolher o tipo de lâmpada que vai ser utilizado no sistema a dimensionar. De acordo com o tipo de lâmpada escolhido pelo utilizador, são então apresentadas as suas características. O botão presente

no topo da figura 4.11 denominado "Inserir lâmpada" permite adicionar novos tipos de lâmpadas à base de dados da ferramenta. Após serem gravadas na base de dados podem ser escolhidas pelo utilizador.

Inserir lâmpada		Tipo de lâmpada		
	Lâmpada	fluorescente T5	LED	Fluorescente 28w
P	Potência da lâmpada (W)	30	20	28
	Fluxo luminoso (lm)	3000	2000	2800
V	Vida útil (h)	12000	50000	70000
Pr	Preço da lâmpada (€)	10	17	8
	Utiliza Balastro	Eletrónico	Não	Eletrónico

Figura 4.11: Tipo de lâmpada

O comando "Inserir lâmpada" apresenta ao utilizador o formulário apresentado na figura 4.12 onde é possível observar os diferentes dados que é necessário inserir para que a lâmpada seja adicionada com sucesso à base de dados. A escolha do tipo de balastro é necessária para o cálculo de potência total instalada do sistema.

O formulário, intitulado "Adicionar lâmpada", contém os seguintes campos e controlos:

- Tipo/Nome: Campo de texto.
- Potência: (W): Campo de texto.
- Fluxo luminoso: (lm): Campo de texto.
- Vida útil: (horas): Campo de texto.
- Preço: (€): Campo de texto.
- Utiliza balastro?: Grupo de controlos com uma caixa de seleção rotulada "Escolher opção".
- Gravar: Botão de ação.
- Fechar: Botão de ação.

Figura 4.12: Formulário para adicionar lâmpada

Seguidamente, é necessário escolher o tipo de luminária que vai ser utilizado no recinto em estudo. Existem diversos tipos de luminárias presentes na ferramenta, que representam vários tipos de luminárias existentes. Cada luminária apresentada possui uma tabela de fator de utilização que a ferramenta utiliza para retirar o fator de utilização, dependendo do índice de recinto e dos

coeficientes de reflexão das paredes, teto e piso. É apresentado o fator de utilização para a luminária escolhida. Após a escolha da luminária é necessário escolher o número de lâmpadas que vão ser colocadas em cada luminária. O fator de manutenção é calculado, tendo em conta o ambiente existente no recinto e o período de manutenção do equipamento, escolhidos pelo utilizador.


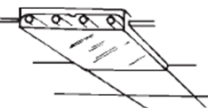

Luminária				
	Tipo	Luminária comercial	Luminária encastrada com difusor	Luminária encastrada para lâmpada
	Esquema			
n	Lâmpadas por luminária	Duas	Quatro	Duas
$\phi$	Fluxo luminoso da luminária (lm)	6000	8000	5600
	Tabela em uso	10	14	3
A a J	Índice de recinto	D	A	D
FU	Fator de utilização	0.53	0.43	0.9
Fator de manutenção				
	Ambiente	Ambiente normal	Ambiente limpo	Ambiente normal
	Período de manutenção (h)	5000h	2500h	7500h
FM	Fator de manutenção	0.85	0.95	0.8

Figura 4.13: Luminária, fator de utilização e fator de manutenção

Por fim, é apresentado o cálculo da quantidade de luminárias necessárias a instalar no recinto para se obter a iluminância desejada. Os restantes cálculos apresentados permitem informar o utilizador sobre a potência do sistema dimensionado, a sua eficiência e o valor médio da iluminância no recinto. O cálculo do número de luminárias, quando resulta num valor fracionário, é arredondado para um valor inteiro superior, sendo de seguida calculada a iluminância média para que o valor seja o mais exato.

Alguns dos cálculos presentes na parte final do cálculo luminotécnico são também apresentados no processo de análise de sistemas. A presença destes cálculos, nesta fase, é justificada pela necessidade de observar as características dos sistemas dimensionados caso sejam realizadas modificações ou diferentes experiências com tipos de lâmpadas e luminárias e também para permitir uma comparação inicial dos diferentes recintos em estudo.

Cálculos finais				
N	Quantidade de luminárias	6	23	8
nl	Quantidade de lâmpadas	12	92	16
Pt	Potência total instalada (kW)	0.396	1.84	0.493
D	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	7.9	12.3	10.1
Dr	Densidade de potência relativa (W/m <sup>2</sup> /100 lux)	2.63	2.46	2.02
Em	Iluminância média (lux)	324	501	497

Figura 4.14: Cálculos finais

### 4.3.2 Análise de Sistemas

A análise de sistemas é realizada de forma diferente se o sistema foi dimensionado no cálculo luminotécnico ou se foi introduzido na ferramenta como uma representação de um sistema em operação no recinto em estudo. Apesar de as folhas de cálculo serem bastante similares, como é possível observar nas figuras 4.5 e 4.6, existem funcionalidades diferentes entre si.

#### 4.3.2.1 Análise de Sistemas Dimensionados

No topo da folha de cálculo, apresentada na figura 4.6, são apresentados um conjunto de botões, figura 4.15, com o nome dos recintos dimensionados no processo cálculo luminotécnico, que permitem ao utilizador escolher o sistema que pretende analisar. Se o nome do recinto for alterado na folha de cálculo luminotécnico, o nome do botão muda automaticamente.

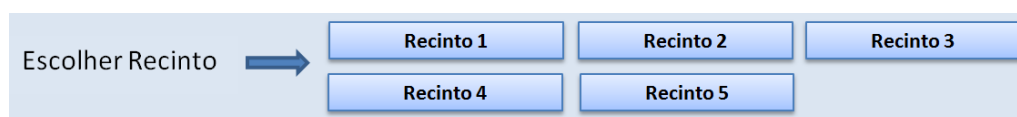


Figura 4.15: Escolha de sistema de iluminação dimensionado

Se o utilizador escolher um dos sistemas dimensionados, os dados referentes aos diversos componentes do sistemas são apresentados tal como na figura 4.16.

Lâmpada e Balastro			L
Vida útil da lâmpada	horas	12000	
Preço da lâmpada	€	10	
Potência da lâmpada	W	30	
Quantidade de lâmpadas	n	12	
Luminária			
Preço da luminária	€	35	
Quantidade de luminárias	N	6	
Recinto			
Comprimento do recinto	metros	5	
Largura do recinto	metros	10	
Nível de iluminância	lux	300	
Geral			
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	350	
Custo de projeto	€	100	
Custo de instalação	€	100	
Preço do kWh	€	0.13	

Figura 4.16: Dados do sistema dimensionado

O preço da luminária, tempo de uso mensal de iluminação, custo de projeto, custo de instalação e o preço do kWh são dados que o utilizador deve introduzir. O tempo de uso mensal de iluminação e o preço do kWh são relativos ao recinto em estudo. O custo de projeto e de instalação dependem da empresa ou responsável pelo projeto e do custo de mão de obra utilizada. O preço da luminária caso seja escolhido valor nulo implica que não existe substituição das luminárias existentes no recinto.

Por fim são apresentados na figura 4.17 os cálculos finais para o sistema dimensionado.

Cálculos		
Nome do Recinto	<b>Escritório</b>	
Custo de investimento	<b>380</b>	€
Durabilidade média das lâmpadas	<b>130</b>	Meses
Consumo mensal	<b>92.4</b>	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	<b>12.012</b>	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	<b>2.333</b>	€
Potência total instalada	<b>0.264</b>	kW
Densidade de potência	<b>66</b>	W/m2
Densidade de potência relativa	<b>2.122</b>	W/m2 p/100 lux


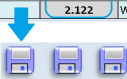


Figura 4.17: Cálculos do sistema dimensionado

As três imagens representativas de uma disquete, presentes na zona inferior da folha de cálculo, permitem copiar os cálculos finais para o processo de comparação de sistemas. Na figura 4.18 é apresentado um exemplo que demonstra a cópia de dados.

Cálculos		
Nome do Recinto	<b>Escritório</b>	
Custo de investimento	<b>380</b>	€
Durabilidade média das lâmpadas	<b>130</b>	Meses
Consumo mensal	<b>92.4</b>	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	<b>12.012</b>	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	<b>2.333</b>	€
Potência total instalada	<b>0.264</b>	kW
Densidade de potência	<b>66</b>	W/m2
Densidade de potência relativa	<b>2.122</b>	W/m2 p/100 lux

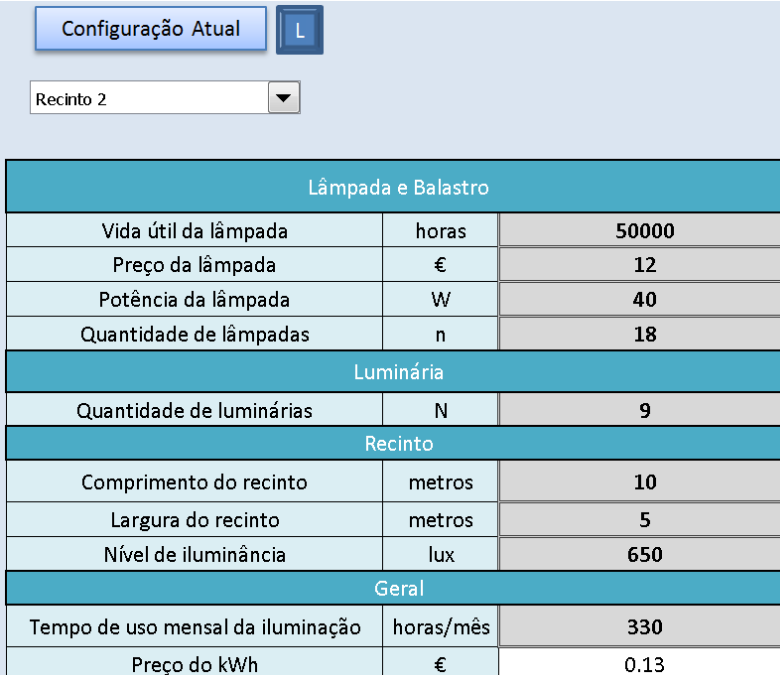


	<b>Escritório</b>			
Custo de investimento (€)	<b>380</b>			€
Durabilidade média das lâmpadas (meses)	<b>129.87013</b>			meses
Consumo mensal (kWh/Mês)	<b>92.4</b>			kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia (€)	<b>12.012</b>			€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas (€)	<b>2.33333333</b>			€
Potência total instalada (kW)	<b>0.264</b>			kW
Densidade da potência (W/m2)	<b>66</b>			W/m2
Densidade da potência relativa (W/m2 p/100 lux)	<b>2.12150434</b>			W/m2/100 lux

Figura 4.18: Comparação de sistemas de iluminação

### 4.3.2.2 Análise de Sistemas em Operação

Para ser possível analisar um sistema de iluminação, que existe em operação no recinto em estudo, é necessário, em primeiro lugar, adicionar o sistema à base de dados da ferramenta utilizando o botão denominado "Configuração Atual", que é apresentado na zona superior da figura 4.19. Uma vez adicionados à base de dados os sistemas de iluminação podem ser escolhidos para análise na folha de cálculo.



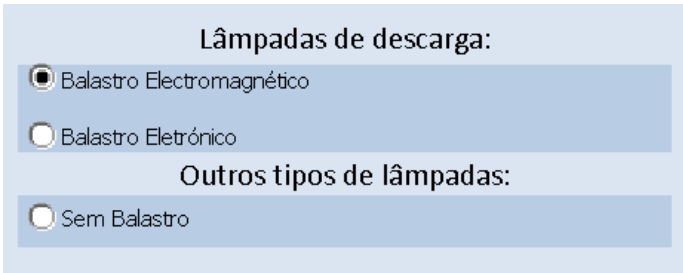
Configuração Atual **L**

Recinto 2 ▼

Lâmpada e Balastro		
Vida útil da lâmpada	horas	50000
Preço da lâmpada	€	12
Potência da lâmpada	W	40
Quantidade de lâmpadas	n	18
Luminária		
Quantidade de luminárias	N	9
Recinto		
Comprimento do recinto	metros	10
Largura do recinto	metros	5
Nível de iluminância	lux	650
Geral		
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	330
Preço do kWh	€	0.13

Figura 4.19: Dados do sistema em operação

É possível observar na figura 4.19 que o preço do kWh é um valor escolhido pelo utilizador da ferramenta isto porque dependendo do tipo de instalação esse valor pode variar. É também necessário escolher se existe a utilização de balastro ou não, tal como apresentado na figura 4.20.



**Lâmpadas de descarga:**

☒ Balastro Electromagnético

☐ Balastro Eletrónico

**Outros tipos de lâmpadas:**

☐ Sem Balastro

Figura 4.20: Dados do sistema em operação

Na figura 4.21 é apresentado o formulário que permite adicionar um sistema de iluminação em operação.

UserForm1

Nome do recinto:

Dimensões:

Comprimento (m)

Largura (m)

Dados sobre a lâmpada em uso no recinto:

Potência (W)

Preço (€)

Vida útil (horas)

Quantidade

Dados sobre a luminária em uso no recinto:

Quantidade

Tempo de uso mensal da iluminação (horas/mês):

Nível de iluminância medido no recinto:

Gravar Fechar

Figura 4.21: Formulário para adicionar sistema de iluminação em operação

A obtenção dos cálculos finais para o sistema escolhido é bastante similar à utilizada na folha de cálculo para sistemas dimensionados, no entanto, não existe custo de investimento uma vez que se trata de um sistema já instalado no recinto. A cópia de dados para o processo de comparação de sistemas é realizada da mesma forma.

### 4.3.3 Comparação de Sistemas

Tal como mencionado anteriormente, é possível copiar os cálculos realizados com os dados dos sistemas de iluminação dimensionados e em operação. Na folha de cálculo para comparação de sistemas, existem três áreas onde é possível colocar esses dados. A organização dos dados adicionados, bem como o nome dos respectivos sistemas é apresentada na figura 4.22. É possível também observar na zona inferior que existe um quadro onde é apresentado o cálculo de retorno de investimento. É realizado um cálculo de retorno de investimento com dois sistemas exemplo, um sistema em operação e um sistema dimensionado para o mesmo recinto.



	Recinto 1	RecintoAntigo	Recinto 2	
Custo de investimento (€)	530	0	0	€
Durabilidade média das lâmpadas (meses)	86.580	15.152	175.365	meses
Consumo mensal (kWh/Mês)	138.6	396	285.12	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia (€)	18.018	51.48	37.066	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas (€)	3.5	7.7	1.4	€
Potência total instalada (kW)	0.396	1.2	0.864	KW
Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	7.92	24	17.28	W/m <sup>2</sup>
Densidade de potência relativa (W/m <sup>2</sup> p/100 lux)	2.64	3.43	2.65	W/m <sup>2</sup> /100 lux

Retorno do Investimento		
Recinto 1	e	RecintoAntigo
14.1 Meses		

Figura 4.22: Comparação de sistemas de iluminação

Na figura 4.23 é apresentada a zona da folha de cálculo que permite comparar diferentes sistemas com recurso a um gráfico de barras. Os dados apresentados são escolhidos pelo utilizador.

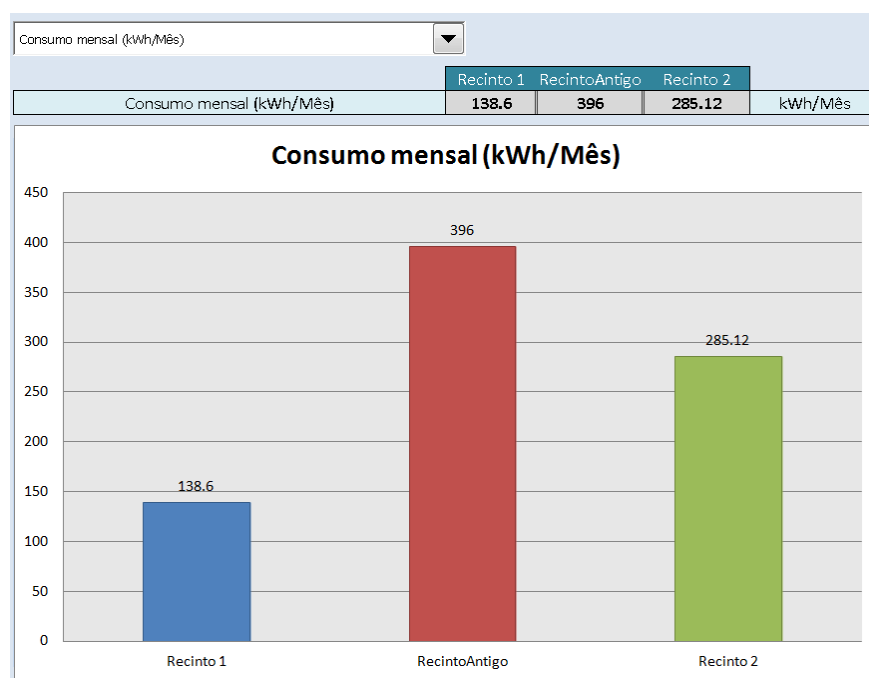


Figura 4.23: Comparação de sistemas de iluminação com recurso a um gráfico de barras



## **Capítulo 5**

### **Caso de Estudo - Serviterme**

O desenvolvimento da ferramenta que conduziu à escrita desta dissertação foi realizado numa parceria da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com a empresa Serviterme. A Serviterme é uma empresa de prestação de serviços de engenharia, mecânica e eletrotécnica, nas áreas de consultoria, certificação energética, auditorias energéticas e qualidade do ar interior. A parceria mencionada permitiu obter um estudo mais aprofundado relativamente aos processos envolvidos no decorrer de uma auditoria energética e o tipo de informação que é necessário recolher e analisar em relação às instalações que são estudadas. A informação recolhida foi uma ajuda muito importante para o desenvolvimento das diversas funcionalidades presentes na ferramenta.

Neste capítulo, são utilizados dois projetos de alteração ao sistema de iluminação presente num dos recintos existente nas instalações da empresa Serviterme do Porto. A utilização de dados relativos ao sistema em operação e a sistemas projetados permite testar a ferramenta e perceber se os resultados obtidos se aproximam do sistema projetado. A possibilidade de realizar o levantamento das características do recinto permite também simular uma situação de utilização da ferramenta em condições reais.

#### **5.1 Sistema de Iluminação em Operação**

O sistema de iluminação estudado foi o sistema presente no recinto de maior dimensão das instalações da empresa Serviterme no Porto. Este espaço é destinado a trabalho de secretária com recurso a computadores. O levantamento de dados deste recinto foi realizado com a ajuda de um luxímetro e de um medidor de distâncias laser. O luxímetro é um aparelho utilizado para medir o nível de iluminância num determinado recinto e o medidor de distâncias laser permite medir a distância entre dois pontos com bastante precisão, o que facilita o levantamento das dimensões do recinto.

Uma vez que o recinto em estudo não apresenta forma paralelepípedica e a ferramenta desenvolvida utiliza o método do fator de utilização foram escolhidas as maiores distâncias para os

valores de comprimento e largura do recinto. O nível de iluminância médio apresentado resulta de um conjunto de medidas efetuadas em diferentes pontos do espaço.

Os dados obtidos são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Escritórios Serviterme

Dados do recinto em estudo	
Comprimento	14.266 metros
Largura	5.269 metros
Altura	2.702 metros
Altura da luminária	0 metros (Encastrada)
Altura do plano de trabalho	0.693 metros
Cor do teto, paredes e piso	Cor Branca
Iluminância média	571 lux
Quantidade de luminárias	10
Quantidade de lâmpadas	40

As luminárias utilizadas no recinto são de montagem encastrada, o que implica uma altura do plano útil medida entre o teto e o plano de trabalho. Cada luminária possui quatro lâmpadas fluorescentes tubulares do tipo *OSRAM FQ 24W/840*. As características da lâmpada são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Lâmpada utilizado no recinto em estudo

OSRAM FQ 24 Watts 840	
Fluxo luminoso	1750 lúmen
Potência	24 Watt
Vida útil	24000 horas
Preço	4 euros

Na figura 5.1 é apresentada a lâmpada *OSRAM FQ 24W/840*. As lâmpadas presentes no sistema de iluminação existente no recinto utilizam balastro eletrónico.



Figura 5.1: Lâmpada OSRAM FQ 24W/840

Relativamente ao sistema de iluminação, é necessário referir que o tempo de uso semanal da iluminação é de 60 horas semanais, o que representa aproximadamente 260 horas mensais. O preço de kWh cobrado a esta instalação é de 0.12 euros.

Na figura 5.2 e 5.3 podem ver-se duas representações do recinto em estudo obtidas em *DIALux*. Na figura 5.2 é possível observar a zona do recinto onde estão colocadas as secretárias. Esta é a zona onde deve existir um nível de iluminância mais elevado garantindo assim ótimas condições de trabalho.



Figura 5.2: Representação em *DIALux*, perspectiva lateral

Na figura 5.3 é apresentada outra perspectiva do recinto, onde é possível observar que as secretárias estão distribuídas por um dos lados da sala, permitindo uma zona de passagem no lado contrário.



Figura 5.3: Representação em *DIALux*, perspectiva frontal

## 5.2 Sistemas de Iluminação Propostos

São apresentados em seguida dois projetos com diferentes sistemas de iluminação propostos. O Projeto A representa uma proposta realizada por uma entidade externa a pedido da Serviterme e o Projeto B é o resultado de um estudo realizado na Serviterme. É importante referir que não existe relação entre os dois projetos e a sua utilização permitiu testar a ferramenta desenvolvida.

### 5.2.1 Projeto A - Externo

O sistema de iluminação proposto no Projeto A representa um projeto desenvolvido em *DI-ALux* de acordo com as dimensões do recinto e o nível de iluminância que é necessário garantir. Este projeto apresenta apenas uma proposta de alteração de luminárias e lâmpadas com um valor de investimento que apenas contabiliza essas duas alterações.

A luminária presente no sistema de iluminação proposto é do tipo *Downlight* e representa um sistema único, composto por um conjunto luminária e lâmpada. A lâmpada utilizada neste sistema é do tipo *LED* e possui um ângulo de abertura elevado o que permite uma distribuição de luz uniforme sem a necessidade de recorrer a uma lente. Na figura 5.4 é apresentado o conjunto *Downlight LED*.



Figura 5.4: *Downlight LED 25W*

As características deste conjunto são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3: *Downlight LED*

<i>Downlight LED 25W</i>	
Fluxo luminoso	1850 lúmen
Potência	25 Watt
Vida útil	50000 horas
Preço	119.67 euros
<i>Multichip LED 25W</i>	
Preço	9 euros

Neste projeto é proposto um sistema de iluminação composto pelas luminárias *Downlight* apresentadas para substituir o atual sistema de iluminação existente no recinto. Existe então a

necessidade de substituir as luminárias e as lâmpadas existentes. O sistema proposto no projeto implica utilizar 30 luminárias distribuídas pelo recinto tal como é apresentado no Anexo A. Na tabela 5.4 é apresentado o preço total do sistema.

Tabela 5.4: Sistema de Iluminação proposto

Número de luminárias	Preço por luminária	Preço total
30	119.67	3590.1 euros

### 5.2.2 Projeto B - Serviterme

O Projeto B representa um sistema de iluminação desenvolvido em *DIALux* de acordo com as características do recinto e com maior pormenor relativamente ao estudo das necessidades de diferentes níveis de iluminância para diferentes pontos do espaço. Este projeto apresenta uma proposta de alteração de luminárias e lâmpadas, com um posicionamento específico do equipamento no recinto.

A luminária presente no sistema de iluminação proposto é de montagem encastrada na qual são incluídas três lâmpadas fluorescentes tubulares T5 que utilizam balastro eletrónico. Na figura 5.5 é apresentada a luminária *TRILUX Cetrrix 600*.

Figura 5.5: *TRILUX Cetrrix 600*

As características da lâmpada e da luminária são apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Características da luminária e lâmpada

<i>TRILUX Cetrrix 600</i>	
Preço	162 euros
Lâmpada T5 14W	
Fluxo luminoso	3600 lúmen
Potência	14 Watt
Vida útil	25000 horas
Preço	3.69 euros

Neste projeto é proposto um sistema de iluminação composto por nove luminárias, com um posicionamento específico que permite garantir níveis de iluminância adequados às necessidades das diferentes zonas que constituem o recinto em estudo.

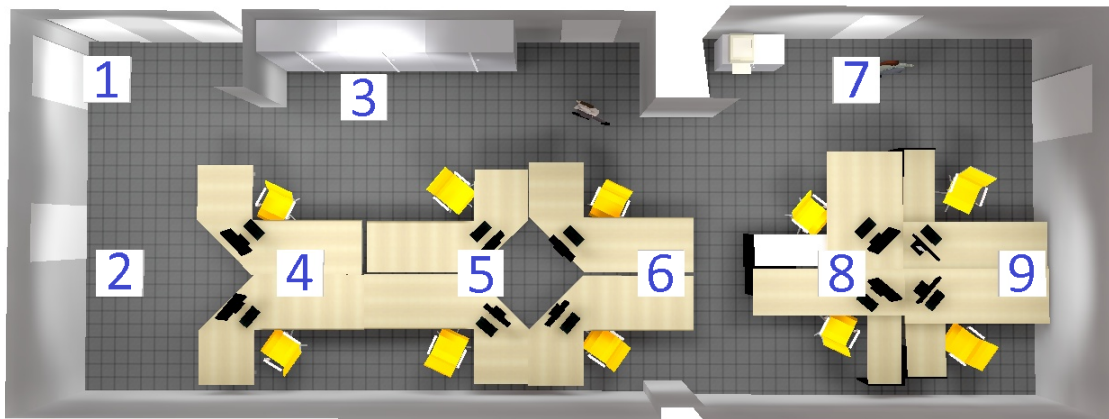


Figura 5.6: Representação em *DIALux*, distribuição das luminárias

É possível observar na figura 5.6 que grande parte das luminárias é posicionada para garantir um nível de iluminância mais elevado nas secretárias presentes no recinto. As zonas de circulação e de acesso a outros recintos não necessitam de um nível de iluminância muito elevado.

Na figura 5.7 é apresentado um gráfico onde é possível observar os diferentes níveis de iluminância na superfície correspondente ao plano a iluminar.

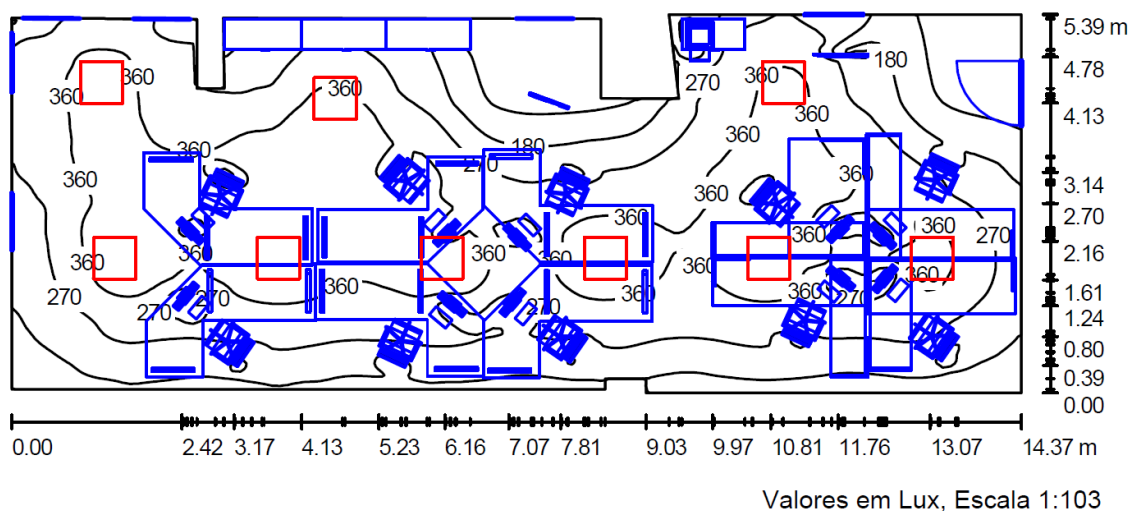


Figura 5.7: Níveis de iluminância para o plano a iluminar na perspectiva vertical

Os valores de iluminância média e máxima apresentados no projeto são:

- **Iluminância média** - 282 Lux;
- **Iluminância máxima** - 452 Lux.



## 5.3 Simulação na Ferramenta Desenvolvida

Após uma breve apresentação do sistema de iluminação em operação e dos sistema propostos é apresentada a simulação efetuada na ferramenta desenvolvida.

### 5.3.1 Sistema de Iluminação em Operação

Em primeiro lugar, é adicionada à base de dados da ferramenta o sistema de iluminação em operação no recinto em estudo, através do formulário apresentado na figura 4.21. Os dados do sistema são apresentados na figura 5.8.

Serviterme

Lâmpada e Balastro		
Vida útil da lâmpada	horas	<b>24000</b>
Preço da lâmpada	€	<b>4</b>
Potência da lâmpada	W	<b>24</b>
Quantidade de lâmpadas	n	<b>40</b>
Luminária		
Quantidade de luminárias	N	<b>10</b>
Recinto		
Comprimento do recinto	metros	<b>14.266</b>
Largura do recinto	metros	<b>5.269</b>
Nível de iluminância	lux	<b>571</b>
Geral		
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	<b>240</b>
Preço do kWh	€	0.121

Figura 5.8: Sistema de iluminação em operação

Na folha de cálculo, figura 5.8, é necessário inserir o valor do preço do kWh, sendo neste caso 0.121 euros para a instalação em causa. Este valor foi fornecido pelo responsável pela instalação, tal como acontece no decorrer de uma auditoria energética. É necessário escolher também o tipo de balastro que é utilizado no sistema de iluminação, sendo neste caso, balastro eletrónico.

**Lâmpadas de descarga:**

☐ Balastro Electromagnético

☒ Balastro Eletrónico

**Outros tipos de lâmpadas:**

☐ Sem Balastro

Figura 5.9: Balastro em utilização no sistem de iluminação em operação

Por fim, são apresentados na figura 5.10 os cálculos obtidos para o sistema em operação. O custo de investimento é nulo uma vez que o sistema apresentado está em operação no recinto. Os cálculos finais apresentados vão ser utilizados posteriormente no processo de comparação de sistemas.

Cálculos		
Nome do Recinto	Serviterme	
Custo de Investimento	0	€
Durabilidade média das lâmpadas	94.697	Meses
Consumo mensal	253.440	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	30.666	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	1.6	€
Potência total instalada	1.056	kW
Densidade de potência	14.049	W/m <sup>2</sup>
Densidade de potência relativa	2.460	W/m <sup>2</sup> p/100 lux

Figura 5.10: Cálculos finais para o sistema de iluminação em operação

### 5.3.2 Sistemas de Iluminação Propostos

A ferramenta que conduziu à escrita desta Dissertação foi desenvolvida com o objetivo de efetuar cálculos luminotécnicos e de rentabilidade relativamente às instalações que é necessário estudar. Mas, neste caso de estudo, como já possuímos propostas desenvolvidas em software específico de cálculo luminotécnico, mais concretamente em *DIALux*, é possível testar a ferramenta utilizando a mesma configuração de sistema de iluminação, para comparar os resultados finais do cálculo luminotécnico entre o projetos em *DIALux* e os dados obtidos com a ferramenta desenvolvida. Mais concretamente, o objetivo é então utilizar o mesmo tipo de luminária e lâmpada do sistema proposto, para obter o cálculo luminotécnico e perceber a proximidade que existe entre os resultados obtidos com a ferramenta e os resultados apresentados no projeto.

#### 5.3.2.1 Projeto A - Externo

Utilizando a folha de cálculo, onde é realizado o processo de cálculo luminotécnico, é necessário escolher o nível de iluminância adequado ao espaço. Como se trata de um recinto destinado a escrita, leitura, processamento de dados e trabalho no computador, segundo a norma (*EN 12464-1*) o nível de iluminância adequado é 500 Lux. São inseridos também os dados relativos às dimensões do recinto, a altura do plano de trabalho e a altura da luminária. As luminárias são do tipo *Downlight*, logo a sua montagem é encastrada, o que implica uma altura útil medida entre o teto e o plano de trabalho.

Na figura 5.11 é apresentado o processo descrito e o cálculo do respetivo índice de recinto.

E	Nível de iluminância desejado	500 Lux ▼
C	Comprimento (m)	14.266
L	Largura (m)	5.269
A	Área (m2)	75.168
H	Altura (m)	2.702
h	Altura da luminária (m)	0
hpt	Altura do plano de trabalho (m)	0.693
hu	Altura útil (m)	2.009
K	Índice de recinto	1.915

Figura 5.11: Cálculo de índice de recinto

Seguidamente, é necessário definir a cor das paredes, teto e piso do recinto para a obtenção dos respetivos coeficientes de reflexão. A lâmpada utilizada é a que foi mencionada no sistema de iluminação proposto cujas características estão presentes na tabela 5.3. Através do formulário para inserir lâmpada é adicionado o *Downlight LED* à base de dados e é escolhido posteriormente para o processo de cálculo luminotécnico, como apresentado na figura 5.12.

	Cor do teto	Branco ▼
	Cor da parede	Branco ▼
	Cor do piso	Branco ▼
$\rho_1$	Teto	0.8
$\rho_2$	Parede	0.8
$\rho_3$	Piso	0.8
	Lâmpada	SERVITERME LED ▼
P	Potência da lâmpada (W)	25
	Fluxo luminoso (lm)	1850
V	Vida útil (h)	50000
Pr	Preço da lâmpada (€)	9
	Utiliza Balastro	Não

Figura 5.12: Coeficientes de reflexão e tipo de lâmpada

Após a escolha do tipo de lâmpada é necessário escolher a luminária. Tal como foi referido anteriormente, a ferramenta possui um conjunto de luminárias cujas tabelas de fator de utilização são utilizadas para o cálculo luminotécnico sendo por isso necessário escolher um tipo de luminária com características similares à luminária presente no sistema proposto. Sendo assim, foi escolhida

a "Downlight para lâmpada refletora". É escolhida uma lâmpada por luminária, para simular o sistema proposto, e é escolhido um ambiente limpo e um período de manutenção reduzido, tal como apresentado na figura 5.13.


	Tipo	Downlight para lâmpada refletora ▼
	Esquema	
n	Lâmpadas por luminária	Uma ▼
$\varphi$	Fluxo luminoso da luminária (lm)	1850
	Tabela em uso	3
A a J	Índice de recinto	E
FU	Fator de utilização	0.88
	Ambiente	Ambiente limpo ▼
	Período de manutenção (h)	2500h ▼
FM	Fator de manutenção	0.95

Figura 5.13: Tipo de luminária e fator de manutenção

É então obtido o cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação configurado. São apresentados os diferentes cálculos finais na figura 5.14. É possível observar que o número de lâmpadas calculado para este tipo de configuração é de 26 lâmpadas, o que representa um valor bastante próximo das 30 lâmpadas presentes no sistema de iluminação proposto no projeto em *DIALux*.

N	Quantidade de luminárias	26
nl	Quantidade de lâmpadas	26
Pt	Potência total instalada (kW)	0.65
D	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	8.6
Dr	Densidade de potência relativa (W/m <sup>2</sup> /100 lux)	1.72
Em	Iluminância média (lux)	496

Figura 5.14: Cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação do Projeto A

Na figura 5.15 são apresentados os dados do processo de análise de sistemas dimensionados. O preço da luminária é colocado de acordo com o preço total do conjunto luminária e lâmpada tal como apresentado no sistema proposto. O tempo de uso mensal da iluminação e o preço do kWh têm que ser os mesmos que foram utilizados para o sistema de iluminação em operação.

Relativamente aos custos, são inseridos valores nulos uma vez que no projeto em *DIALux* não existe nenhuma referência a seu respeito.

Lâmpada e Balastro		
Vida útil da lâmpada	horas	50000
Preço da lâmpada	€	9
Potência da lâmpada	W	25
Quantidade de lâmpadas	n	26
Luminária		
Preço da luminária	€	119.67
Quantidade de luminárias	N	26
Recinto		
Comprimento do recinto	metros	14.266
Largura do recinto	metros	5.269
Nível de iluminância	lux	496
Geral		
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	240
Custo de projeto	€	0
Custo de instalação	€	0
Preço do kWh	€	0.121

Figura 5.15: Análise do sistema de iluminação do Projeto A

Como é possível observar na figura 5.16, o preço de investimento é um pouco inferior ao apresentado para o sistema proposto uma vez que o número de lâmpadas calculadas é inferior, 26 em vez de 30.

Cálculos		
Nome do Recinto	<b>Projeto A</b>	
Custo de investimento	<b>3345.42</b>	€
Durabilidade média das lâmpadas	<b>321</b>	Meses
Consumo mensal	<b>156</b>	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	<b>18.876</b>	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	<b>1.1232</b>	€
Potência total instalada	<b>0.65</b>	kW
Densidade de potência	<b>8.647</b>	W/m2
Densidade de potência relativa	<b>1.745</b>	W/m2 p/100 lux

Figura 5.16: Cálculos finais para o sistema de iluminação do Projeto A

Após a análise do sistema é importante realizar uma comparação entre sistemas para perceber o tipo de redução de consumos que é possível obter e a viabilidade do projeto proposto.

Os resultados do processo de comparação de sistemas são apresentados na figura 5.17.

	Projeto A	Serviterme	
Custo de investimento (€)	3345.42	0	€
Durabilidade média das lâmpadas (meses)	320.513	94.697	meses
Consumo mensal (kWh/Mês)	156	253.44	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia (€)	18.876	30.666	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas (€)	1.1232	1.6	€
Potência total instalada (kW)	0.65	1.056	kW
Densidade da potência (W/m <sup>2</sup> )	8.647	14.049	W/m <sup>2</sup>
Densidade da potência relativa (W/m <sup>2</sup> p/100 lux)	1.745	2.460	W/m <sup>2</sup> /100 lux

Figura 5.17: Comparação de sistemas de iluminação

Tendo em conta a densidade de potência relativa dos dois sistemas é possível observar que o sistema de iluminação proposto é mais eficiente do que o sistema em operação. A análise do consumo mensal de energia permite evidenciar com bastante clareza a diferença entre os dois sistemas de iluminação, dado que o consumo mensal do sistema proposto é bastante inferior.

É importante comparar também o custo do consumo mensal de energia para perceber o nível de poupança que o Projeto A pode representar.

Na figura 5.18 é apresentada uma comparação entre os dois sistemas.

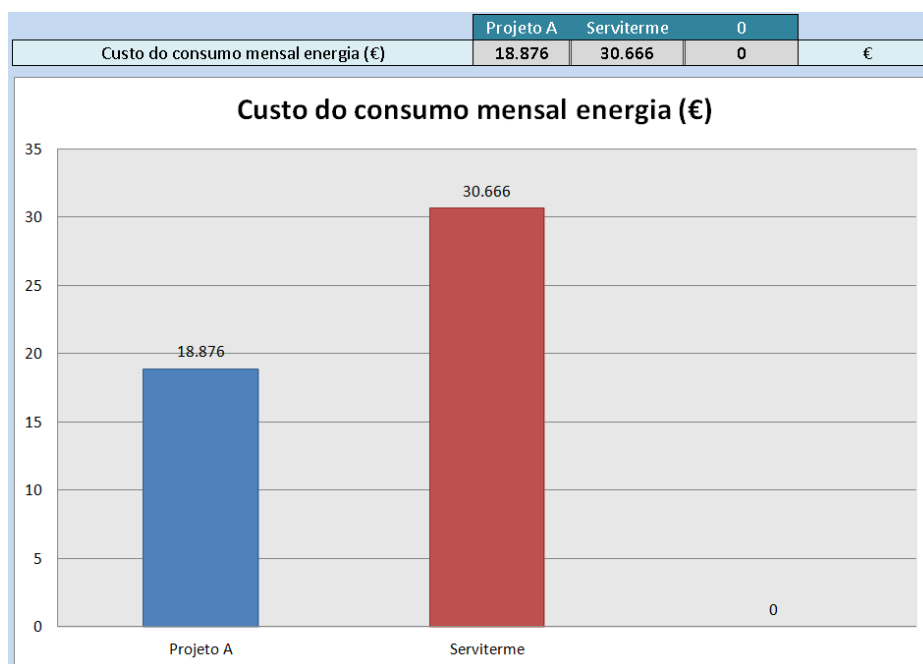


Figura 5.18: Custo do consumo mensal de energia

O sistema proposto no Projeto A consome uma média de 18.88 euros por mês enquanto que o sistema em operação consome uma média de 30.67 euros por mês. Esta diferença de consumos implica uma poupança de 11.79 euros caso o sistema proposto substitua o que se encontra em operação.

Na figura 5.19 é apresentado o cálculo de retorno de investimento.

Retorno do Investimento		
Serviterme	e	Projeto A
272.7		Meses

Figura 5.19: Retorno de investimento para o Projeto A

O período necessário para recuperar o investimento inicial realizado no novo sistema seria de 272.7 meses, ou seja, aproximadamente 23 anos. Sendo assim, o período de retorno de investimento é muito elevado. Este elevado investimento inicial necessário não se justifica uma vez que a poupança nos consumos obtida não é suficiente para recuperar o investimento num período de tempo aceitável.

É importante referir que a proposta apresentada não é atual e que o tipo de componentes escolhidos são atualmente muito mais eficientes, como é o caso do tipo de *LED* utilizado. Como as lâmpadas *LED* utilizadas no sistema proposto possuem um rendimento luminoso muito próximo das lâmpadas utilizadas no sistema em operação, o preço elevado do conjunto luminária e lâmpada limita a viabilidade do Projeto A.

### 5.3.2.2 Projeto B - Serviterme

Usando o mesmo procedimento utilizado para o Projeto A, é realizado o processo de cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação proposto no Projeto B. Uma vez que o recinto em estudo é o mesmo, os cálculos de índice de recinto, coeficientes de reflexão e o nível de iluminância escolhido não se alteram.

A lâmpada utilizada é a que foi mencionada no sistema de iluminação proposto cujas características estão presentes na tabela 5.5. Através do formulário para inserir lâmpada é adicionada à base de dados e é escolhida posteriormente para o processo de cálculo luminotécnico como é apresentado na figura 5.20.

	Lâmpada	SERVITERME T5 14W
P	Potência da lâmpada (W)	14
$\varphi$	Fluxo luminoso (lm)	3600
V	Vida útil (h)	50000
Pr	Preço da lâmpada (€)	3.69
	Utiliza Balastro	Eletrónico

Figura 5.20: Tipo de lâmpada

Após a escolha da lâmpada é necessário escolher o tipo de luminária. A luminária escolhida foi a "Luminária encastrada com difusor em plástico" e, como apresentado no sistema de iluminação proposto, foram escolhidas três lâmpadas por luminária.

Na figura 5.21 é apresentada a luminária escolhida.

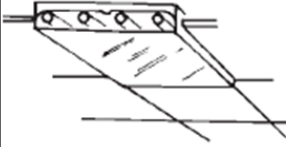
	Tipo	Luminária encastrada com difusor ▼
	Esquema	
n	Lâmpadas por luminária	Três ▼
$\varphi$	Fluxo luminoso da luminária (lm)	10800
	Tabela em uso	14
A a J	Índice de recinto	E
FU	Fator de utilização	0.37

Figura 5.21: Tipo de luminária

É então obtido o cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação configurado. São apresentados os diferentes cálculos finais na figura 5.22. É possível observar que o número de lâmpadas calculado para este tipo de configuração é de 30 lâmpadas, o que representa um valor bastante próximo das 27 lâmpadas presentes no sistema de iluminação, proposto no projeto B. As três lâmpadas acima do valor presente no projeto representam uma luminária a mais. É importante referir que o nível de iluminância escolhido para o processo luminotécnico foi de 500 lux, enquanto que no sistema proposto o nível médio de iluminância era de 282 Lux.

N	Quantidade de luminárias	10
n	Quantidade de lâmpadas	30
Pt	Potência total instalada (kW)	0.462
D	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	6.1
Dr	Densidade de potência relativa (W/m <sup>2</sup> /100 lux)	1.22
Em	Iluminância média (lux)	505

Figura 5.22: Cálculo luminotécnico para o sistema de iluminação do Projeto B

Uma vez finalizado o processo de cálculo luminotécnico é possível proceder à análise de sistemas dimensionados.



Na figura 5.23 é apresentada a análise do sistema, onde é possível observar os dados que são necessários introduzir. O preço do kWh e o tempo de uso mensal da iluminação não se alteram, no entanto, é necessário introduzir o preço da luminária tal como apresentado nas características do Projeto B na tabela 5.5. Os custos de projeto e de instalação são colocados a valor nulo uma vez que não existem dados suficientes no projeto a seu respeito.

Lâmpada e Balastro		
Vida útil da lâmpada	horas	50000
Preço da lâmpada	€	3.69
Potência da lâmpada	W	14
Quantidade de lâmpadas	n	30
Luminária		
Preço da luminária	€	162
Quantidade de luminárias	N	10
Recinto		
Comprimento do recinto	metros	14.266
Largura do recinto	metros	5.269
Nível de iluminância	lux	505
Geral		
Tempo de uso mensal da iluminação	horas/mês	240
Custo de projeto	€	0
Custo de instalação	€	0
Preço do kWh	€	0.121

Figura 5.23: Análise do sistema de iluminação do Projeto B

Após a introdução dos dados necessários, é possível obter os cálculos finais no processo de análise de sistemas dimensionados, tal como apresentado na figura 5.24.

Cálculos		
Nome do Recinto	<b>Projeto B</b>	
Custo de investimento	<b>1730.7</b>	€
Durabilidade média das lâmpadas	<b>451</b>	Meses
Consumo mensal	<b>110.88</b>	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia	<b>13.416</b>	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas	<b>0.531</b>	€
Potência total instalada	<b>0.462</b>	kW
Densidade de potência	<b>6.146</b>	W/m <sup>2</sup>
Densidade de potência relativa	<b>1.217</b>	W/m <sup>2</sup> p/100 lux

Figura 5.24: Cálculos finais para o sistema de iluminação do Projeto B

Tendo em conta os cálculos obtidos para o sistema em operação e para o sistema de iluminação proposto no Projeto A, é possível observar que os valores apresentados são bastante mais

reduzidos. Em relação ao preço de investimento, este é maioritariamente composto pelo preço das luminárias. Para perceber se o sistema proposto é viável é necessário proceder à comparação de sistemas.

Na figura 5.25 é apresentada a comparação entre o sistema de iluminação proposto no Projeto B e o sistema em operação no recinto em estudo. A comparação permite perceber que o sistema proposto é superior em todos os aspetos analisados. Se observarmos o cálculo de densidade de potência relativa o valor apresentado para o Projeto B é aproximadamente metade do valor do sistema em operação, ou seja, o sistema proposto é mais eficiente porque para garantir o mesmo nível de iluminância consome menos.

	Projeto B	Serviterme	
Custo de investimento (€)	1730.7	0	€
Durabilidade média das lâmpadas (meses)	450.938	94.697	meses
Consumo mensal (kWh/Mês)	110.88	253.44	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia (€)	13.41648	30.666	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas (€)	0.531	1.6	€
Potência total instalada (kW)	0.462	1.056	kW
Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	6.146	14.049	W/m <sup>2</sup>
Densidade de potência relativa (W/m <sup>2</sup> p/100 lux)	1.217	2.460	W/m <sup>2</sup> /100 lux

Figura 5.25: Comparação de sistemas de iluminação

Na figura 5.26 é apresentada uma comparação entre os consumos dos sistemas. É possível observar que o consumo mensal de energia do sistema proposto é menos de metade do sistema em operação.

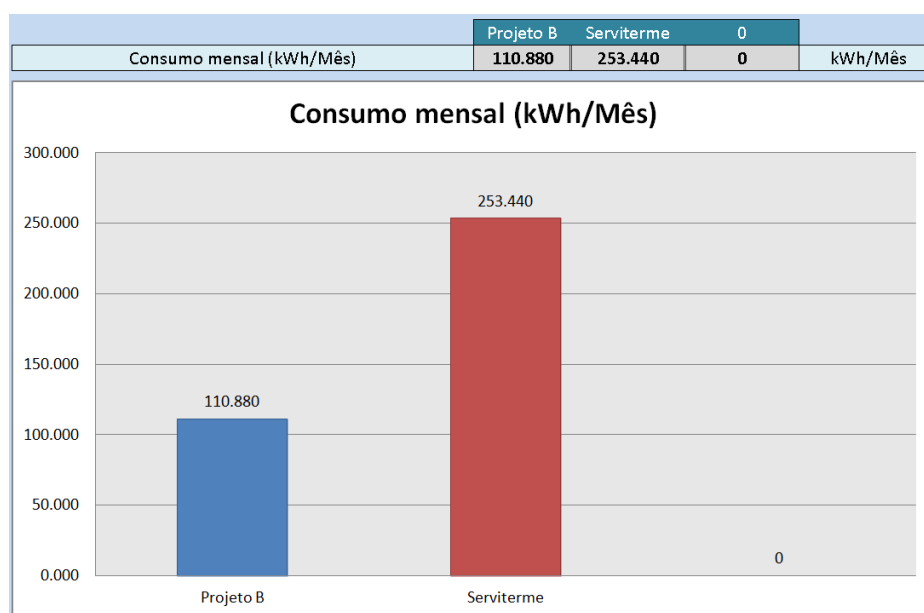


Figura 5.26: Consumo mensal

Na figura 5.27 é apresentada uma comparação entre o custo do consumo mensal de energia. O sistema proposto no Projeto B consome uma média de 13.42 euros por mês enquanto que o sistema em operação consome uma média de 30.67 euros por mês. Esta diferença de consumos implica uma poupança de 17.25 euros caso o sistema proposto substitua o que se encontra em operação.

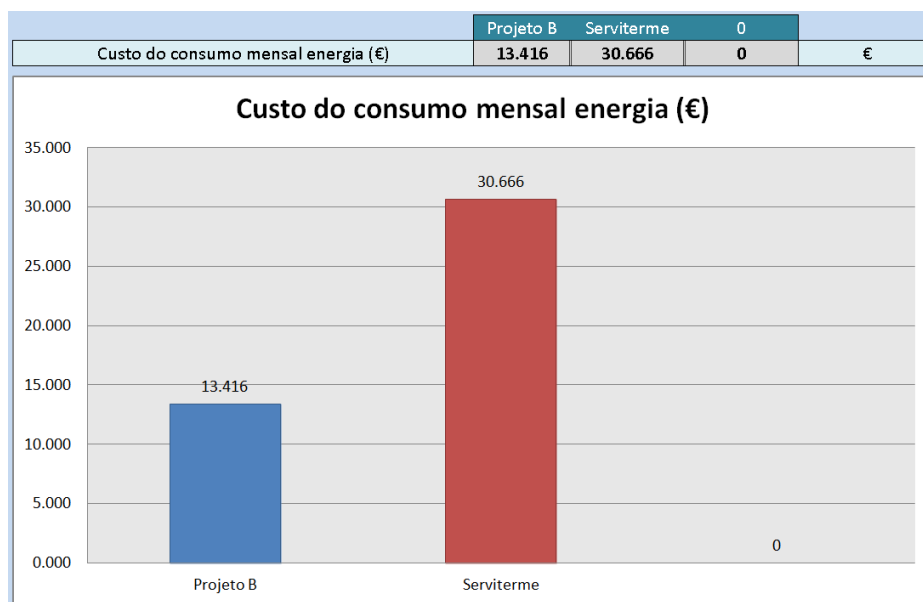


Figura 5.27: Custo do consumo mensal de energia

Tendo em conta a poupança nos consumos de energia mencionada, o período necessário para recuperar o investimento inicial realizado no novo sistema seria de 94.5 meses, ou seja, aproximadamente 8 anos.

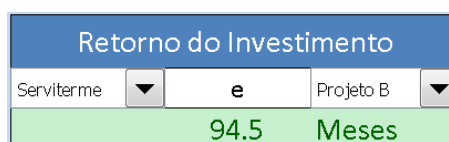


Figura 5.28: Retorno de investimento para o Projeto B

### 5.3.3 Comparação de Sistemas

Após a obtenção das simulações do sistema em operação e dos sistemas propostos é possível comparar os três sistemas. A introdução do sistema em operação, do Projeto A e do Projeto B no processo de comparação de sistemas permite perceber qual o sistema mais eficiente e também permite efetuar uma análise dos seus custos e consumos.

Na figura 5.29 são apresentados os três sistemas no processo de comparação de sistemas.

	Projeto A	Projeto B	Serviterme	
Custo de investimento (€)	3345.42	1730.7	0	€
Durabilidade média das lâmpadas (meses)	320.513	450.938	94.697	meses
Consumo mensal (kWh/Mês)	156	110.88	253.440	kWh/Mês
Custo do consumo mensal energia (€)	18.876	13.416	30.666	€
Custo médio mensal de reposição de lâmpadas (€)	1.1232	0.531	1.6	€
Potência total instalada (kW)	0.65	0.462	1.056	kW
Densidade da potência (W/m <sup>2</sup> )	8.647	6.146	14.049	W/m <sup>2</sup>
Densidade da potência relativa (W/m <sup>2</sup> p/100 lux)	1.745	1.217	2.460	W/m <sup>2</sup> /100 lux

Figura 5.29: Retorno de investimento para o Projeto B

Analisando a densidade de potência relativa dos sistemas apresentados é possível observar que o Projeto B é o mais eficiente, dado que para o mesmo nível de iluminância a sua densidade de potência é menor do que os restantes sistemas, tal como apresentado na figura A.2.

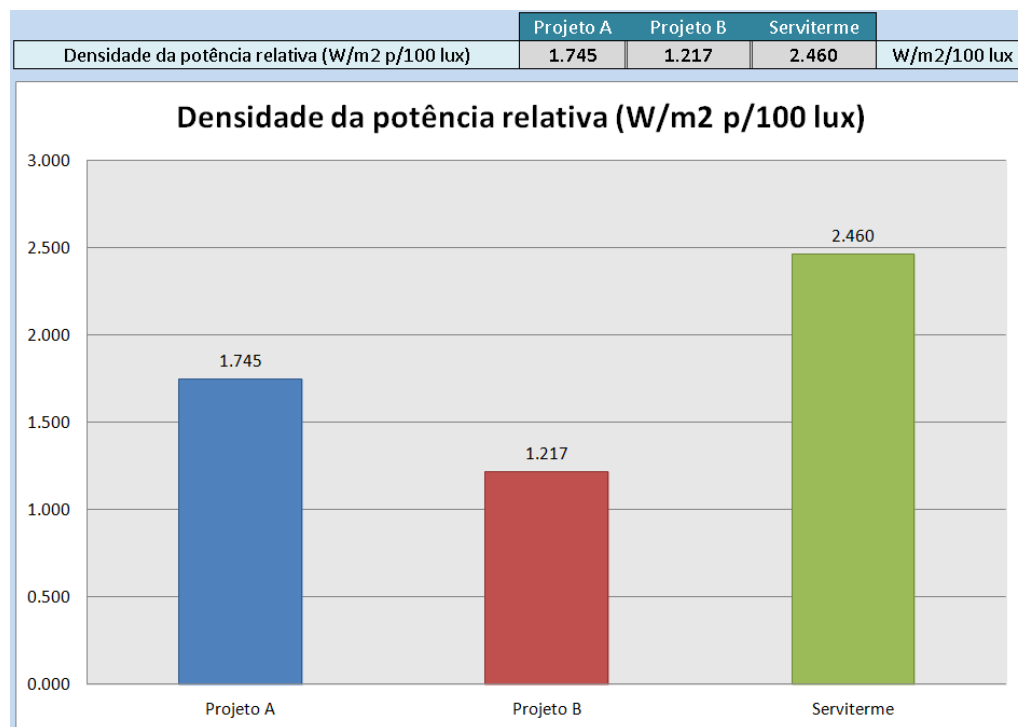


Figura 5.30: Densidade de potência relativa

É importante referir que uma comparação entre sistemas não permite perceber qual o projeto mais viável. Para isso, é necessário calcular o retorno de investimento para os diferentes projetos. O facto de um sistema apresentar consumos mais reduzidos ou ser mais eficiente não implica que seja o mais viável. Vai depender do volume de investimento necessário.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo final é apresentada uma apreciação global do trabalho efetuado e são analisados os objetivos propostos inicialmente. São ainda abordadas algumas sugestões de trabalho futuro.

### 6.1 Satisfação dos Objetivos

O trabalho desenvolvido ao longo do semestre permitiu a construção de uma ferramenta de cálculo luminotécnico e de rentabilidade. Foi possível comprovar as vantagens desta ferramenta, comparando os seus resultados com projetos produzidos em *software* de cálculo luminotécnico, nomeadamente, *DIALux*. Fazendo um levantamento de dados de uma instalação real foi comprovado que a ferramenta pode ser utilizada diretamente no local da auditoria com resultados satisfatórios.

Numa área como a iluminação, para a qual estão direcionados diversos esforços no sentido de racionalizar consumos, a possibilidade de reduzir todo o tempo dedicado a estes esforços traduz-se em poupanças imediatas. O facto de permitir testar diferentes soluções sem recorrer a análise exaustiva de relatórios e dados permite reduzir significativamente o tempo investido no processo, o que representa uma vantagem imediata.

Uma das vantagens da ferramenta desenvolvida é o facto de não ser necessário investir em formação ou em aquisição de *software*, uma vez que a base da ferramenta é o *Microsoft Office Excel*, presente virtualmente em qualquer empresa do século XXI. A utilização deste *software* permitiu desenvolver uma *interface* intuitiva e de aprendizagem integrada com o uso de ferramentas do quotidiano. Outra vantagem é a sua versatilidade, ou seja, pode ser adaptada pelo utilizador, dependendo do método de trabalho, da empresa onde está inserida e do contexto de utilização. De acordo com diferentes cenários de trabalho (escritórios, indústria, estabelecimentos comerciais, entre outros) a base de dados e a configuração da ferramenta pode ser adaptada.

Em relação à empresa auditora é importante referir que esta ferramenta representa uma vantagem competitiva relativamente às restantes, uma vez que permite informar o responsável pelas instalações auditadas durante a fase inicial de levantamento. Relativamente à empresa auditada a grande vantagem é a possibilidade de receber uma estimativa coerente com o relatório final, no

próprio momento de intervenção da empresa auditora. Podem começar, desde logo, a ser delineados os plano de ação e intervenção, incluindo os recursos para tal. Outra vantagem importante é o facto de permitir à empresa auditada obter argumentos para conseguir o financiamento que necessita, uma vez que o retorno de investimento é logo estimado.

## **6.2 Trabalho Futuro**

Como trabalho futuro sugere-se a possibilidade de implementar na ferramenta a capacidade de cálculo para espaços com iluminação natural ou espaços com necessidades de iluminação com orientações específicas. Poderá também fazer sentido integrar cálculos com sensores de luminosidade e de presença para recintos onde estas soluções permitem obter uma redução de consumos. Outra sugestão importante implica integrar na ferramenta uma forma de calcular a uniformidade da iluminância garantindo assim uniformidade na iluminação dos espaços estudados de forma a evitar sombras acentuadas e excesso ou défice de iluminância em determinadas zonas.

É importante referir que o trabalho futuro realizado deve ter em conta o principal objetivo da ferramenta desenvolvida, que é a obtenção de resultados fiáveis e imediatos.

## Anexo A

# Projeto A - Externo

### A.1 Distribuição das Luminárias

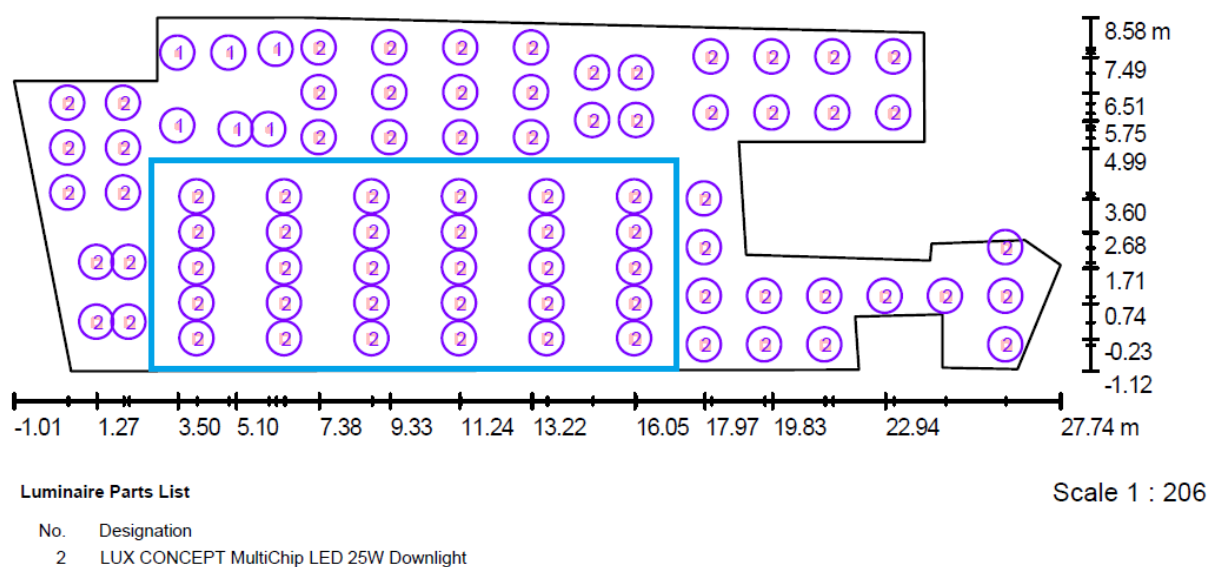


Figura A.1: Distribuição de luminárias proposta no Projeto A

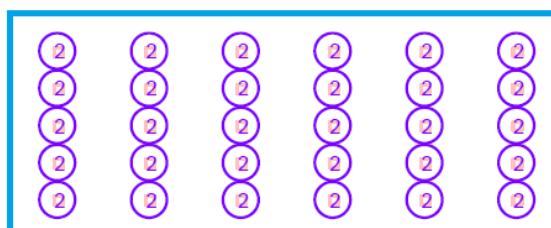


Figura A.2: Distribuição de luminárias no recinto em estudo





# Referências

- [1] ADENE. Medidas de eficiência energética aplicáveis a indústria portuguesa, Julho 2010. <http://www.adene.pt/pt-pt/Publicacoes/Paginas/welcome.aspx>.
- [2] DGEG. Iluminação artificial. <http://www.dgeg.pt/>.
- [3] EDP. Plano de racionalização de consumos de energia. <http://www.edp.pt/pt/empresas/servicosenergia/eficienciaenergetica/Pages/PlanodeRacionaliza%C3%A7%C3%A3o.aspx>.
- [4] ADENE. Eficiência energética na indústria, Janeiro 2004. <http://www.adene.pt/pt-pt/Publicacoes/Paginas/welcome.aspx>.
- [5] LEEC Gestão de Energia Eléctrica. Enquadramento regulamentar (rgce) e metodologias de implementação de programas de racionalização. <http://lge.deec.uc.pt/ensino/gee/aulas%20teoricas/auditorias.PDF>.
- [6] OSRAM. Manual luminotécnico prático. [http://www.osram.com.br/osram\\_br/Ferramentas\\_%26\\_Catlogos/Downloads/Iluminacao\\_Geral/index.html](http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_%26_Catlogos/Downloads/Iluminacao_Geral/index.html).
- [7] I. Pedrosa. *O universo da cor*. Senac, 2003.
- [8] DGEG. Grandezas e unidades. <http://www.dgeg.pt/>.
- [9] J.R. Vázquez. *Luminotecnia: enciclopedia CEAC de electricidad*. Enciclopedia CEAC de electricidad. Pro Fide, 1973. URL: [http://books.google.pt/books?id=a1z\\_QQAACAAJ](http://books.google.pt/books?id=a1z_QQAACAAJ).
- [10] H. Creder. *Instalações Eléctricas*. Livros Técnicos e Científicos, 2007. URL: <http://books.google.pt/books?id=HKFONAAACAAJ>.
- [11] Armínio Teixeira. Eficiência energética das instalações de iluminação. <http://paginas.fe.up.pt/~arminio/teci/apontamentos.html>.
- [12] UNEP. Energy efficiency guide for industry in asia. [http://www.unep.org/publications/search/pub\\_details\\_s.asp?ID=3773](http://www.unep.org/publications/search/pub_details_s.asp?ID=3773).
- [13] TECI AAT. Tipos de lâmpadas. [http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/L%E2mpadas/Fontes\\_Lumin.pdf](http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/L%E2mpadas/Fontes_Lumin.pdf).
- [14] Lucínio Prezade Araújo. Tipos e características de lâmpadas - sistemas de iluminação. <http://prof2000.pt/users/lpa>.
- [15] Lamptech. The mercury vapour lamp. <http://www.lamptech.co.uk/Documents/M1%20Introduction.htm>.

- [16] The Encyclopedia of Alternative Energy e Sustainable Living. Fluorescent tube and circline lamp. [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/F/AE\\_fluorescent\\_tube.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/F/AE_fluorescent_tube.html).
- [17] Rexel Energy Solutions. T5 vs t8 fluorescent lamps. [http://rexel.rootmadison.com/\\_blog/Rexel\\_Blog/post/T5\\_vs\\_T8\\_Fluorescent\\_Lamps\\_3/](http://rexel.rootmadison.com/_blog/Rexel_Blog/post/T5_vs_T8_Fluorescent_Lamps_3/).
- [18] OSRAM. Benefits of t5. [http://www.osram.pt/osram\\_pt/Profissional/Illuminacao\\_geral/Fluorescent\\_lamps/The\\_economical\\_light/Benefits\\_of\\_T5.html](http://www.osram.pt/osram_pt/Profissional/Illuminacao_geral/Fluorescent_lamps/The_economical_light/Benefits_of_T5.html).
- [19] PHILIPS. Fluorescent tubes. <http://www.usa.philips.com/c/fluorescent-tubes/296298/cat/en/>.
- [20] Lamptech. The low pressure sodium lamp. <http://www.lamptech.co.uk/Documents/SO%20Introduction.htm>.
- [21] RyanTechnology. Lâmpadas de indução. <http://www.ledmodules.org/pt/induction-lamps.html>.
- [22] howstuffworks. How light emitting diodes work. <http://electronics.howstuffworks.com/led3.htm>.
- [23] PHILIPS. Led lamps. <http://www.ecat.lighting.philips.com/l/lamps/led-lamps-and-systems/led-lamps/21063/cat/>.
- [24] PHILIPS. Led tubes. <http://www.ecat.lighting.philips.com/l/lamps/led-lamps-and-systems/led-tubes/21064/cat/>.
- [25] PHILIPS. The smart starter: a smart idea. [http://www.smartstarter.eu/smart\\_idea.html](http://www.smartstarter.eu/smart_idea.html).
- [26] Sylvania. Balastros descarga. [http://www.iluminacion.net/sylvania/balastos\\_descargaext.html](http://www.iluminacion.net/sylvania/balastos_descargaext.html).
- [27] PHILIPS. Electronic ignitor for hid lamp circuits. [http://www.ecat.lighting.philips.com/l/lighting-electronics/hid/ignitors/electronic-ignitor-for-hid-lamp-circuits/22120/cat/#t=overview&filterState=FG\\_LP\\_TYPE%7CLighting+Electronics%3Dchecked?t1=overview](http://www.ecat.lighting.philips.com/l/lighting-electronics/hid/ignitors/electronic-ignitor-for-hid-lamp-circuits/22120/cat/#t=overview&filterState=FG_LP_TYPE%7CLighting+Electronics%3Dchecked?t1=overview).
- [28] PHILIPS. Hid-basic bhl mk4 for hpl/hpi. <http://www.ecat.lighting.philips.pt/l/lighting-electronics/hid/eletromagnetico-hid/hid-basic-bhl-mk4-for-hpl-hpi/40783/cat/>.
- [29] PHILIPS. Primavision compact for cdm. <http://www.ecat.lighting.philips.pt/l/lighting-electronics/hid/hid-electronic-indoor/primavision-compact-for-cdm/59789/cat/?t1=overview#t=overview>.
- [30] E.L.M. Mehl. Qualidade da energia elétrica. *Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*, páginas 1–8, 2004.
- [31] Ambercaps. Lighting capacitors. <http://www.ambercaps.com/lighting/seriescp.htm>.

- [32] Climar. Adaar 1x18 a polar. [http://www.climar.pt/prod/adaar/cur/ADAAR\\_1x18\\_A\\_polar.JPG](http://www.climar.pt/prod/adaar/cur/ADAAR_1x18_A_polar.JPG).
- [33] OSRAM. Iluminação: Conceitos e projetos. [http://www.osram.com.br/osram\\_br/Ferramentas\\_%26\\_Catlogos/Downloads/Iluminacao\\_Geral/index.html](http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_%26_Catlogos/Downloads/Iluminacao_Geral/index.html).
- [34] Climar. Datch. [http://www.climar.pt/br/prod\\_datch.html](http://www.climar.pt/br/prod_datch.html).
- [35] PHILIPS. Luminárias de interior. <http://www.ecat.lighting.philips.pt/1/luminarias-de-interior/57636/cat/>.
- [36] M.S. Rea. The iesna lighting handbook: reference & application. 2000.
- [37] DIN EN 12464-1:2011. Light and lighting - lighting of work places - part 1: Indoor work places. 2011.
- [38] Lucínio Prezade Araújo. Projecto de iluminação interior. <http://prof2000.pt/users/lpa>.
- [39] DIAL light building software. Dialux evo features. <http://www.dial.de/DIAL/en/dialux/dialux-evo/features.html>.
- [40] EDP. Uso da electricidade. <http://www.edp.pt/pt/particulares/faqs/Pages/Usodaeltectricidade.aspx>.
- [41] EDP. Facturação. <http://www.edp.pt/pt/particulares/faqs/Pages/Factura%C3%A7%C3%A3o.aspx>.